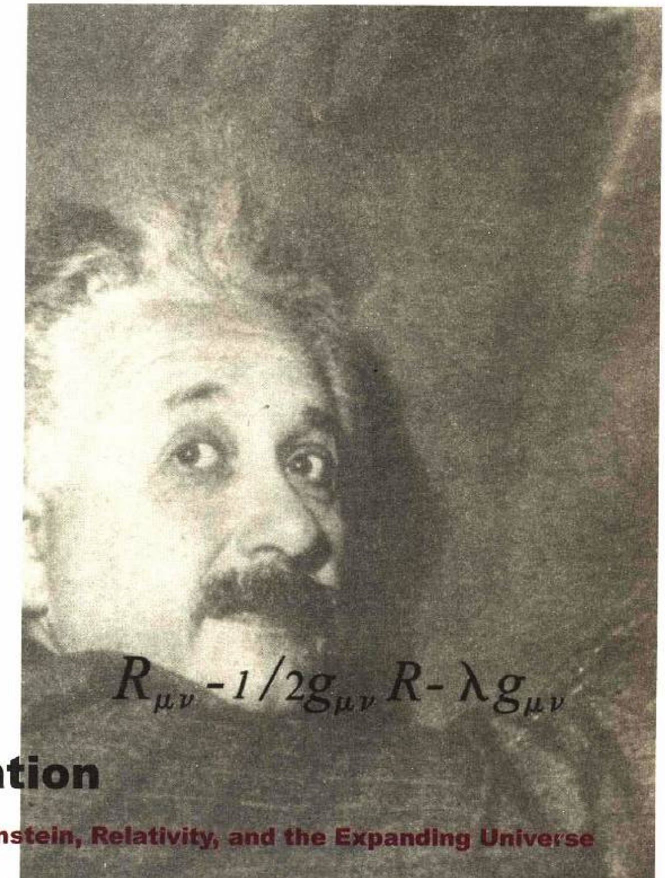


开放人文



God's Equation

Einstein, Relativity, and the Expanding Universe

[美] 阿米尔·D·阿克塞尔 著　　薛密 译

Amir D. Aczel

上帝的方程式

爱因斯坦、相对论和膨胀的宇宙

上海世纪出版集团




ISBN 7-5327-3660-1
9 787532 736607
定价：22.00 元
易文网：www.ewen.cc

上帝的方程式

爱因斯坦、相对论和膨胀的宇宙

[美] 阿米尔 · D · 阿克塞尔　著　　薛密 译

世纪出版集团　上海译文出版社

出版说明

自中西文明发生碰撞以来，百余年的中国现代文化建设即无可避免地担负起双重使命。梳理和探究西方文明的根源及脉络，已成为我们理解并提升自身要义的借镜，整理和传承中国文明的传统，更是我们实现并弘扬自身价值的根本。此二者的交汇，乃是塑造现代中国之精神品格的必由进路。世纪出版集团倾力编辑世纪人文系列丛书之宗旨亦在于此。

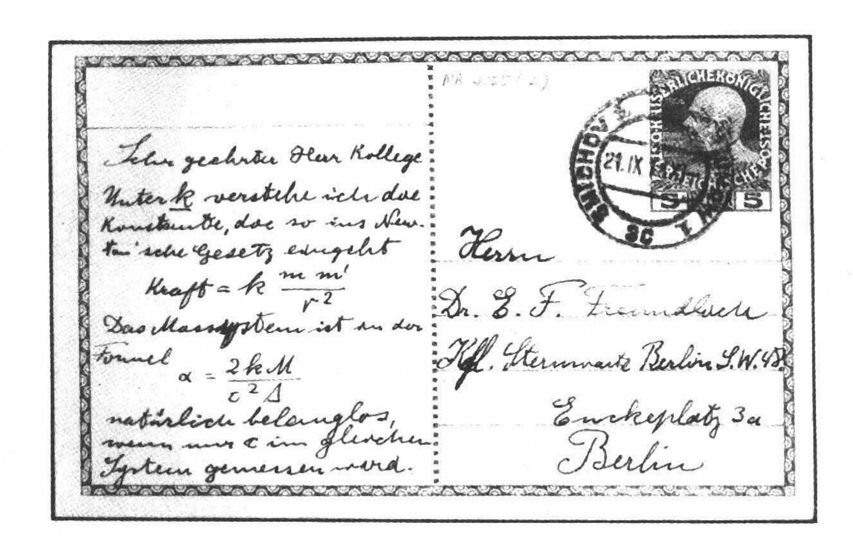
世纪人文系列丛书包涵“世纪文库”、“世纪前沿”、“袖珍经典”、“大学经典”及“开放人文”五个界面，各成系列，相得益彰。

“厘清西方思想脉络，更新中国学术传统”，为“世纪文库”之编辑指针。文库分为中西两大书系。中学书系由清末民初开始，全面整理中国近现代以来的学术著作，以期为今人反思现代中国的社会和精神处境铺建思考的进阶；西学书系旨在从西方文明的整体进程出发，系统译介自古希腊罗马以降的经典文献，借此展现西方思想传统的生发流变过程，从而为我们返回现代中国之核心问题奠定坚实的文本基础。与之呼应，“世纪前沿”着重关注二战以来全球范围内学术思想的重要论题与最新进展，展示各学科领域的新近成果和当代文化思潮演化的各种向度。“袖珍经典”则以相对简约的形式，收录名家大师们在体裁和风格上独具特色的经典作品，阐幽发微，意趣兼得。

遵循现代人文教育和公民教育的理念，秉承“通达民情，化育人心”的中国传统教育精神，“大学经典”依据中西文明传统的知识谱系及其价值内涵，将人类历史上具有人文内涵的经典作品编辑成为大学教育的基础读本，应时代所需，顺时势所趋，为塑造现代中国人的人文素养、公民意识和国家精神倾力尽心。“开放人文”旨在提供全景式的人文阅读平台，从文学、历史、艺术、科学等多个面向调动读者的阅读愉悦，寓学于乐，寓乐于心，为广大读者陶冶心性，培植情操。

“大学之道，在明明德，在新民，在止于至善”（《大学》）。温古知今，止于至善，是人类得以理解生命价值的人文情怀，亦是文明得以传承和发展的精神契机。欲实现中华民族的伟大复兴，必先培育中华民族的文化精神；由此，我们深知现代中国出版人的职责所在，以我之不懈努力，做一代又一代中国人的文化脊梁。

上海世纪出版集团
世纪人文系列丛书编辑委员会
2005年1月



Sehr geehrter Herr Kollege

Unter k verstehe ich die Konstante, die so ins Newton'sche Gesetz eingeht

$$\text{Kraft} = k\,\frac{m\,m'}{r^2}$$

Das Masssystem ist in der Formel

$$\alpha = \frac{2kM}{c^2\Delta}$$

natürlich belanglos, wenn nur c im gleichen System gemessen wird.

Herrn

Dr. E. F. Freundlich

Kgl. Sternwarte Berlin S.W. 48

Enckeplatz 3a

Berlin

1911年9月21日阿尔贝特·爱因斯坦寄给埃尔温·弗罗因德利希的明信片。

前　言

1998年1月，我们对宇宙的理解彻底地改变了。天文学家找到了宇宙正在以日益增长的速率膨胀的证据。这个新发现一经宣布，世界各地的宇宙学家们就急急忙忙地试图解释这个隐晦的现象。科学家们能够提供的最有希望的理论是阿尔贝特·爱因斯坦(Albert Einstein)在80年前曾经提出过但很快又撤回的那个理论，他将它称之为他最大的错误。每年都有新的发展证明爱因斯坦的理论的正确性。但是，如果宇宙学家们的新的评价是正确的，那么爱因斯坦即使当他以为自己错了的时候，他实际上还是正确的。

大约就在这条令人震惊的消息被报道之时，我收到了一封有点古怪的信。信是L·P·莱贝尔(L. P. Lebel)寄来的。他是我的《费马大定理》(*Fermat's Last Theorem*)一书的特约审稿人，后来我们成了朋友并一直有书信往来。然而这一次，信封里没有信，有的只是从《纽约时报》上剪下来的乔治·约翰逊(George Johnson)的一篇文章。我怀着极大的兴趣读了这篇文章，它是关于纯粹数学而不是物理学或

宇宙学的。在这篇文章中，约翰逊先生提出了一个很有迷惑力的问题：有没有可能在宇宙的某处存在另一种形式的——不同于我们自己的——数学？作为例子，约翰逊给出了关于 π 和圆周的问题。他问道：是否存在圆周长与直径之比不等于 π 的圆？

表面上看来，爱因斯坦及宇宙论与圆不再是我们知道的那种圆的离奇的数学毫不相干。但是，我很清楚这两者之间存在着密切的联系。对物理学和数学中这些类似事件的冥思苦想将我带回到 20 年前。我在加利福尼亚大学伯克利分校求学期间，曾选修了物理学和数学的几门课程。其中有一门课程，教授在解释一个我持有异议的概念时说道："电子，生存于与我们的生存空间不同的空间中。"这句话使我改变了我的科研方向，从那时起，我选修研究各种空间的课程：拓扑学、分析和微分几何。我想要了解这些尽管我们感觉不到却依然存在的各种空间。这些陌生的空间可以适用于非常小的范围(在量子力学中)，也可以适用于非常大的范围(在广义相对论中)。要了解相对论的物理学，我们必须研究这样的空间：它的几何学与我们的直观是背道而驰的。

约翰逊的离奇的数学和宇宙论者的爱因斯坦方程实际上是同一枚硬币的两面。我渐渐地越来越沉湎于这些迷人的想法之中。我花了许多时间去解非欧几何中的问题。非欧几何是数学的一个分支，在它处理的空间中，一条直线可以有无数条经过一给定点的平行线，而不像欧氏空间中只有一条：在这种空间中，圆周长与直径的比也不等于 π。(在寻找能说明他发现的时空中的曲率的数学理论时，阿尔贝特·爱因斯坦研究过非欧几何。)我重新研究了微分几何中的一些老问题，这是另一种形式的几何学。我还花时间阅读了爱因斯坦关于广义相对论的全部论文。

最近，重新回顾了我对相对论中数学部分的理解后，我打电话给我过去在伯克利的一位教授，向他请教有关广义相对论的几何学的某些问题。陈省身(S.S.Chern)无可争辩地是当今最伟大的几何学家。我们在电话中谈了很长时间，他耐心地回答了我所有的问题。当我告诉他我正打算写一本关于相对论、宇宙学和几何学，以及它们怎样互相结合起来解释宇宙的书时，他说："对一本书来说，这个想法极妙，但是写这本书肯定要花去你生命中太多的年月……我不会去写它。"接着他挂上了电话。

我决定先向自己解释膨胀着的宇宙、爱因斯坦天才的广义相对论的场方程和我们生存于其中的不可思议地弯曲的宇宙这三者之间的精确关系。如果我能对自己阐明这些奥秘，并使自己越来越大的好奇心得到满足，那么，我觉得我就能与其他人一起分享这些知识。我阅读了我能找到的关于宇宙学和相对论的每一本书，但是为了真正能理解这些迷人的思想，我必须自己动手推导这些方程。在这方面，一些人对我的帮助远远超出我曾经期望的程度。

我的朋友和邻居艾伦·古思(Alan Guth)，麻省理工学院的Weisskopf物理学教授，是暴胀宇宙(inflationary universe)理论的发现者，暴胀宇宙理论是用于解释大爆炸(big bang)后所发生的一切的最有前途的理论。古思的理论如此成功，以致它现在实际上已成为宇宙学中所有宇宙模型的支柱。艾伦慷慨地让我分享他的研究论文，花了很多时间与我讨论宇宙学和关于时空的奇怪的几何学。同在麻省理工学院教授物理学的彼得·杜尔马什金(Peter Dourmashkin)友善地让我看他关于宇宙学的讲稿，并帮助我搞清楚一些烦心的方程。杰夫·威克斯(Jeff Weeks)，一位数学家和咨询师，帮助我弄明白带有宇宙常数的爱因斯坦场方程与宇宙可能有的各种几何学之间的精确的数

学联系。威廉斯学院的数学家科林·亚当斯(Colin Adams)在进一步揭示隐藏在描述宇宙的数学表述和几何学之间的联系方面帮了我很大的忙。基普·索恩(Kip Thorne)是加州理工学院的世界著名相对论教授和黑洞学家，他在电话采访中极友好地回答了我的问题。保罗·斯坦哈特(Paul Steinhardt)，普林斯顿大学的物理教授和宇宙学、物理学及纯粹数学领域中的一位先驱，让我分享他的见识和理论。牛津大学的罗杰·彭罗塞(Roger Penrose)爵士，一位著名的数学家和宇宙学家，大度地让我了解他对宇宙的独特的思想和理论。

一当我理解了有关的数学和物理学，并且能够真正地明白这些方程是如何决定几何学，以及爱因斯坦的一度被误解的宇宙常数是如何惊人地适合不断加速着的宇宙这个难题时，我就开始与天文学家们交谈，他们是关于我们的宇宙的状态的新闻发布者。劳伦斯伯克利国家实验室的索尔·珀尔马特(Saul Perlmutter)是发布宇宙在快速膨胀消息的国际天文学家组的组长，他慷慨地安排了时间。索尔使我深入地了解了空间膨胀的真实过程以及他和他的研究组成员所发明的巧妙方法，利用这种方法他们通过使用几十亿光年远的发生爆炸的星球的电子图像推知到宇宙膨胀并进行测量。后来，索尔还阅读了本书的手稿并给了我许多宝贵的建议。埃丝特·M·胡(Esther M. Hu)是夏威夷大学的天文学家组的组长，她通过凯克望远镜曾捕捉到宇宙中距离最远的可见物的形象，这是一个距离130亿光年以外的星系，它的光是如此暗淡，且红移如此远，似乎它已处在我们所能希望看到的极限位置。胡向我描述了她的令人惊异的发现过程。她也慷慨地向我提供了有关她的发现的许多有趣的技术细节，包括她观察到的这个星系正在以光速的95.6%的速度远离我们这样的事实。内塔·A·巴考尔(Neta A. Bahcall)是普林斯顿大学的天文学教授，她一直在使用最先

进的观察工具和理论研究宇宙的质量密度，她将她的惊人的研究结果告诉了我。内塔和她的同事们在过去的10年中所从事的所有研究都表明我们的宇宙是小质量的——其大小为最终结束宇宙膨胀所需的最小质量密度的20%。这项研究强烈表明宇宙将永远膨胀下去。

我的朋友杰伊·帕萨乔夫(Jay Pasachoff)是威廉斯学院的霍普金斯天文台台长，夏日的一天，他在马萨诸塞的威廉斯敦接待了我，当时我正埋头于这本书的写作计划之中。我来和他谈话是因为我正在研究阿尔贝特·爱因斯坦本人的著作。我知道爱因斯坦的广义相对论是由1919年日全食期间观察到的太阳周围星光的弯曲而得到确认的。杰伊·帕萨乔夫是世界上关于日食的首屈一指的权威。到我们见面之前，他已观察过26次日全食，我相信，在我们这个星球的历史上，此前还没有一个人观察过这么多次日食。此后，杰伊又观察了多次的日食。杰伊将原始文件和文章的完整资料交给了我，后来他又给我一篇关于阿尔贝特·爱因斯坦在20多年中写给一位不著名的德国天文学家的书信集的文章。这些信件刚由一位私人收藏家捐献给位于曼哈顿的皮尔庞特·摩根图书馆，许多信学者们从未看过，也没有被翻译过。我知道其中将会发掘出很好的材料。

我在皮尔庞特·摩根图书馆的档案室里浏览爱因斯坦写给天文学家埃尔温·弗罗因德利希(Erwin Freundlich)的信件的几个小时中，图书馆的西尔维·梅里安(Sylvie Merian)和英奇·杜邦(Inge Dupont)给了我最好的帮助。他们向我提供了书信集中总共25封爱因斯坦的信件的正式复印件。我感谢查尔斯·哈德洛克(Charles Hadlock)帮助安排了这次访问。

我的父亲E·L·阿克塞尔(E. L. Aczel)船长当时正和我们一起在波士顿过夏天。父亲是在奥匈帝国长大和受教育的，于20世纪30年

代离开那儿成为地中海上的一位船长，他是精通阿尔贝特·爱因斯坦那个时代说和写的那种德语专家。当我问他是否愿意花些时间翻译爱因斯坦的信件时，父亲愉快地答应了。以后的两个多月中，我们一起长时间地研究这些信件。在我们结束一封信的翻译后，他常常会重温其中的一句或一段，深思爱因斯坦使用的那种辛辣的表达方式（“只要你神经紧张，就会无法保护自己。”）或者思考这位物理学家在他毫不客气地拒绝他的年轻同事请他帮助找工作的请求时，真正想些什么。［“斯特鲁韦(Struve)今天咒骂你，你干的不像他所期望的那样。”］父亲细致的眼光和听觉，加上他对每一个细微之处及其在当时当地方言中的含意的推敲，揭示了阿尔贝特·爱因斯坦的一个令人惊讶的新形象。依然是那位温和的，以其博爱仁慈闻名的老人，但是很清楚，爱因斯坦不只是特别有雄心，而且会利用别人以达到自己的目的，而一旦他们对他不再有用时就很快地将其抛弃。传奇中的物理学家现在似乎更为人性化——他有着我们凡人的缺点。

在我对耶路撒冷的爱因斯坦档案馆的访问中，我看到了弗罗因德利希和爱因斯坦两人关系的另一个方面，这反映在弗罗因德利希写给爱因斯坦的信件中。我感谢位于耶路撒冷的犹太国家和大学图书馆的阿尔贝特·爱因斯坦档案馆的迪娜·卡特(Dina Carter)，她给我介绍了许多重要的信件和文件。

以研究阿尔贝特·爱因斯坦的生活和工作为专职的人们形成了一个关系密切的国际性社团，尽管他们遍布于全球各地，从波士顿到普林斯顿、苏黎世、耶路撒冷和柏林。波士顿大学的约翰·施塔赫尔(John Stachel)是许多卷的《阿尔贝特·爱因斯坦论文集》(*Collected Papers of Albert Einstein*)的发起编辑，他向我提供了关于爱因斯坦某些成果的大事年表的有用资料。我在苏黎世瑞士理工学院的朋友

汉斯·金施(Hans Künsch)为我安排了参观爱因斯坦在瑞士的房子，爱因斯坦曾在这所瑞士理工学院学习和任教。

在柏林的马克斯·普朗克(Max Planck)科学史研究所我遇到了两位研究爱因斯坦工作的世界顶级专家。于尔根·雷恩(Jürgen Renn)是研究所所长，他推迟了到波罗的海的一个岛上休假的计划，以便能在我访问柏林期间与我会面。雷恩和他的研究所的同事们发现了关于阿尔贝特·爱因斯坦的科学工作的许多事实，包括这样一个爆炸性的发现：爱因斯坦实际上早在1912年就在他的笔记本上写下了他最后的引力场方程的精确形式，只是由于尚不清楚的原因丢弃了它，而在4年多的艰苦研究后才重新发现了同一公式——从另一个角度展开这个方程。于尔根让我使用他的研究所的资料，允许我查看许多尚未发表的关于爱因斯坦以及他的工作的调查结果。朱塞佩·卡斯塔涅蒂(Giuseppe Castagnetti)，该研究所的一位合作研究者，在我逗留柏林期间也给了我很多帮助。我很感谢他关于爱因斯坦的人品和工作的许多见解。朱塞佩还为我安排了参观爱因斯坦在卡珀斯的农舍。

在柏林期间，我很失望地发现爱因斯坦在柏林的两个住处维特尔斯巴赫街13号和哈贝兰德街5号都没有标志。柏林当局在政府小官员或者小诗人或小艺术家甚至只住过几个月的地方，都用一块纪念性饰板加以标识，但是，对这位永恒的最伟大的物理学家的长期居住处却没有标志。对此我感到困惑和某种程度的烦恼。我在脑子里记下了这个事实：两处没做标识的爱因斯坦居所都位于这座城市的原西柏林部分。在原东柏林中心地区菩提树下大街上的那幢普鲁士科学院旧址的大楼上，确实有一块小饰板纪念这位大科学家从1914年到1932年在科学院任职。

在卡珀斯(原东德的一个村庄)，令人惊奇的事等待着我。不仅爱

因斯坦的房子有很好的标志，而且这座建筑被保留作为这位大科学家的一个纪念馆，成群的访问者前来参观。我感谢管理这所房子的埃里卡·布里茨克夫人让我专门参观了各种设施，包括这所房子不对公众开放的部分，她还让我分享她所知道的有关爱因斯坦的家庭以及他们在这所房子中度过的时光的许多信息。

1998年夏末，在我完成了构思这本书的许多研究，并且感到自己已经能够将宇宙学的理论、天文学的发现、引力和时空的物理学，以及爱因斯坦个人的长期探索历程综合联系在一起时，来了一位访问者。我的好朋友，英国纽卡斯尔大学的物理学家和数学家卡洛·F·巴伦吉(Carlo F. Barenghi)来和我们住在一起。卡洛当时正出席一个在马萨诸塞州西部的伯克希尔山举行的量子理论会议，每天晚上他和我驾车一起回波士顿。在车中，我们谈论宇宙学和宇宙之谜消磨时光。卡洛帮助我深化了本书中某些宇宙学的论述。

我感谢我的出版者约翰·奥克斯(John Oakes)的支持和鼓励，感谢纽约四面八方出版社的尽职尽守的职员凯思林·贝尔登(Kathryn Belden)、菲利普·耀奇(Philip Jauch)和吉尔埃林·赖利(JillEllyn Riley)。

我的妻子德布拉·格罗斯·阿克塞尔(Debra Gross Aczel)在麻省理工学院教写作，她阅读了全部手稿并提出了许多改进本书的建议。德布拉，我感谢你，为你所作的一切。我感谢这篇前言中提到的所有出色人士，感谢他们的热忱、帮助、资料和建议。

目录

1 前言

1 第一章 爆炸的恒星
11 第二章 早年的爱因斯坦
23 第三章 布拉格，1911 年
36 第四章 欧几里得的谜语
51 第五章 格罗斯曼的笔记本
59 第六章 远征克里米亚
77 第七章 黎曼度量
88 第八章 柏林：场方程
102 第九章 普林西比岛，1919 年
118 第十章 联合会议
128 第十一章 对宇宙学的思考
143 第十二章 空间的膨胀
156 第十三章 物质的本质
163 第十四章 宇宙的几何学

170 第十五章 伊利诺伊州巴达维亚，1998年5月4日
179 第十六章 上帝的方程式

191 参考书目
195 译后记

第一章　爆炸的恒星

“真正不平凡的是我们正在使用物理的量度来回答深奥的哲学问题。”

——索尔·珀尔马特

索尔·珀尔马特坐在俯视圣弗朗西斯科湾的伯克利山高处他的办公室中，注视着金门大桥下的落日。太阳越来越红，它的外形分层为一片片的长方形状，它们接着慢慢地消失在蓝灰色的太平洋远处，真是无比壮观的景象。他懂得为什么落日会是红的，为什么天空会是蓝的——索尔·珀尔马特是一位天体物理学家。现在，恰恰正是这个地球上如此普通并且千百万人每天从山顶或沙滩，或从摩天大楼顶上的饭店观察得到的现象，使他感到困惑，他不清楚这个现象对他看到的宇宙那一边那些爆炸的星球意味着什么。

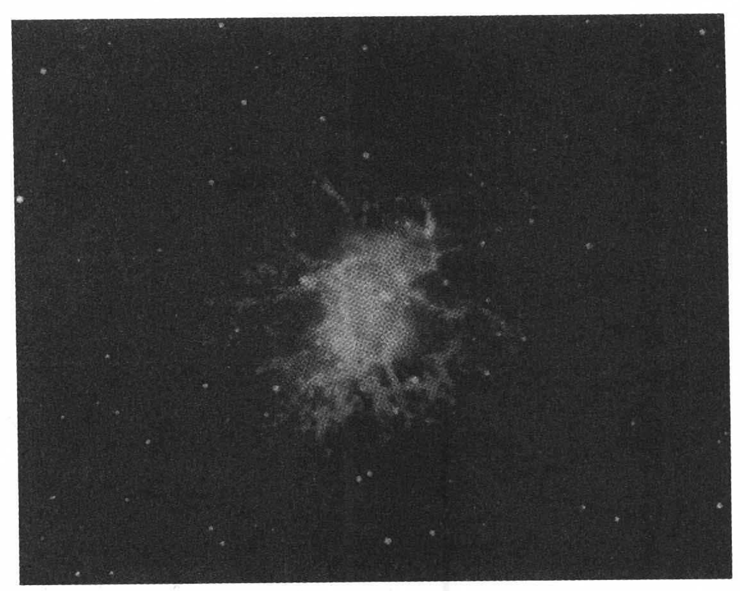
10年来，索尔·珀尔马特指挥着他的总部设在位于隔着金门大桥的对面山上的劳伦斯伯克利国家实验室的一组天文学家进行一种艰

难的尝试。利用最先进的射电望远镜，在夏威夷、智利以及在太空，天文学家们一直在搜集遥远星系的电子图像，一次采集几千个星系，然后与3个星期后采集的这些星系的图像做比较。天文学家们在寻找这些非常遥远的星系中爆炸的恒星，一次爆炸会在星系的照片(实际上是电子图像)上出现一个相对明亮的光点，而在3个星期前的图像上则没有这个亮点。这些科学家们并不是在搜寻普通的爆炸，他们正在寻找Ia型超新星——宇宙中曾观察到的最巨大的爆炸之一。

在公元1054年，中国天文学家记录了一个“客星”，它突然出现在金牛座的一个长角的尖端——我们今天称为金牛座 ζ 星(Zeta Tauri)——的近旁。在一个月内，这个“客星”消失了，但是留下了星云，今天使用中等倍率的望远镜可以观察到。这个暗淡的类云状的物体用M1表示，或因其模糊不清的外形而称为蟹状星云(Crab Nebula)*。蟹状星云是一颗古代的恒星爆炸后留下的气体和微尘组成的巨大云团，并且此后一直向周围的空间膨胀着。在星云的中心存有恒星坍缩而成的核——中子星，它每隔几分之一秒发生脉动向空间发出强烈的辐射，它是一颗*脉冲星*(pulsar)。“客星”根本不是恒星，中国人所观察到的是来自一颗恒星的爆炸的强光，这颗星如此遥远以致在明亮的爆炸之前无法发现它。这样的爆炸称为*超新星*(supernova)。

nova这个词意味着新，而一颗“新星”——一颗不可见的恒星的突然增亮——被认为是一个新的星体的诞生。当白矮星(恒星死亡的

* 蟹状星云，星表编号为NGC 1952和M1，是人们研究力度最大的亮星云。它是英国物理学家和天文爱好者J·比维斯在1731年前后发现的。1758年，著名的梅西叶星表将它列为第一号天体(M1)，并在19世纪中叶获得了蟹状星云的名称。——译者



M1：蟹状星云

一种形式)吸引来自绕轨道运行的伴星的物质并增亮到使它短暂地可见的水平时，会出现这种突然增亮的现象。超新星的出现则明亮得多，我们知道它是由恒星的爆炸引起的。具有讽刺意味的是，它标志着一颗恒星的死亡而不是它的诞生。1987年，现代天文学家在南半球观测到一颗超新星，他们的研究成果教会我们许多关于这些在夜空中发生的神秘爆炸的知识。超新星在前三个世纪中曾被天文学家们观测到，但是，1987年的爆炸则是第一次可以用肉眼看到的爆炸。这是一颗Ⅱ型的超新星。

当一颗质量比太阳还巨大得多的恒星经过氢转化为氦，氦转化为碳的过程，并且后面的那种使它像一颗亮星那样燃烧的核反应耗尽所有的燃料时，这颗恒星自身不再能抵挡住引力的坍缩。当它在自身的重量下向内倒坍时，恒星发生惊人的爆炸。这种爆炸称为Ⅱ型超新星。然后，根据它的大小，恒星的残留将变成叫做中子星的死亡

的致密体(其中普通的质子和电子不再能共存，它们熔合在一起形成中子)，或者——在恒星更为巨大的情形下——黑洞，这是宇宙中最异乎寻常的物体。在后面的这种情形下，物体是如此的致密，并且它的引力产生的拉力如此巨大，以致即使是光也无法从中逃逸。

但是，索尔·珀尔马特和他的同事们在他们探索宇宙的征程中所研究的超新星是全然不同的一种爆炸。这种爆炸可以正确地叫做超超新星，虽然科学家们简单地称它们为Ia型超新星。Ia型超新星的亮度是“普通的”超新星的6倍。在可见的光辐射的范围内，这种爆炸是在空间观测到的最明亮的现象。白矮星是与我们的太阳相同类型的恒星死亡以后的残留物(太阳本身再过50亿年当它耗尽自身的核燃料时，也会变成一颗白矮星)，当白矮星开始聚集，从附近的伴星，即相互绕轨道运行的星体降落到它上面的物质后，会出现Ia型超新星。一旦聚集到的物质使白矮星的质量膨胀到大约我们的太阳的质量的1.4倍时，就会出现突然的、无与伦比的猛烈爆炸。在这种类型的超新星中，从爆炸的白矮星抛射到空间的物质可达到接近于几分之一光速的速度。

Ia型超新星的亮度使它几乎像整个星系那样灿烂。爆炸是巨大的并且可以根据它的特征清楚地确定。正因为后面这个性质，寻找这样的超新星已经成为有兴趣于测量遥远星系的退行距离和速度的天文学家们的急切目标。这些爆炸的星体就像天空中的信标。它们的相对亮度可以告诉天文学家，这些星所在的星系离地球有多远，相对亮度指观测到的亮度与如果爆炸发生在附近(在我们所属的银河系内)我们会观测到的亮度的比值。

天文学家也能够通过测量遥远星系的红移估计它们的退行速度。红移是光射线在它的光源离观察者退行时产生的波长的增加。这个

现象的原理是日常生活中熟悉的多普勒效应(Doppler effect)*——例如，当高速行进的火车经过观察者时声波的音高发生变化。在光中，频率发生类似的变化：当光源离开观察者退行时，光射线的波长增加，也就是说，向着光谱的红端移动；而当光源趋近观察者时，波长减小，也就是说，向着光谱的蓝端移动。这种普遍的向光谱的红端移动的状态，也即天文学家们所称的红移，是由于宇宙的膨胀引起的，红移是埃德温·哈勃(Edwin Hubble)**在20世纪20年代发现的。哈勃定律说：星系离我们越远，它离我们退行得越快。

到了1999年春天，珀尔马特小组已经积累了80个Ia型超新星的资料，这些超新星出现在比哈勃及其后继者观测到的要远得多的星系中。这些爆炸的恒星全都在其光线要经过大约70亿年后才能到达地球的星系中。任何一个星系，在它的几十亿个星体中，大约一个世纪才出现一颗Ia型超新星。那么，珀尔马特小组如何能够得到80个这样的图像呢？小组的成功归功于珀尔马特聪明的搜寻技巧。

即使出现率是如此的低，概率论却断言：如果我们能够观测足够多的星系，那么在任何指定的时刻我们会发现这些白矮星中某些正在爆炸。因此，在同时观测的几万个星系中，总有几个超新星被探测到。对外层空间的同一区域连续两次观测之间相隔三个星期的做法，也是为了这个目的。Ia型超新星增亮大约有18天，然后下一个月中逐渐减亮。由于时间膨胀(狭义相对论的一个结果，因为这些星系以1／2的光速离我们退行)，在地球上的我们看来，似乎是超新星

---

* 多普勒效应，由于观察者和波源的相对运动而使波在到达观察者时的频率同波离开波源时的频率发生一个表观差别。这一现象被用于天文测量、穆斯堡尔效应研究以及雷达和现代导航。1842年奥地利物理学家多普勒第一个描述了这一效应。——译者

** 埃德温·哈勃(1889—1953)，美国天文学家，河外天文学的奠基人和提供宇宙膨胀实测证据的第一人。——译者

在3个星期中经历了大部分的增亮过程。因此，在3个星期的时间间隔内观测遥远的星系，就使天文学家们能够“捕获”和研究在两次采集电子图像之间的时间间隔中出现的超新星。

但是现在，从他在海湾上方的窗口看着正在消失的太阳和滚动着经过金门大桥的雾气，珀尔马特感到苦恼。有些事情他完全不理解。自从20世纪20年代大爆炸理论被提出以解释宇宙的膨胀以来，已经出现各种各样的理论解释过去发生的现象以及它们是怎样发生的，并且对宇宙的未来提出了预见。爱因斯坦的方程预示了几种设想。

第一种设想，宇宙可能是封闭的。在这种情形下，宇宙膨胀最终会停止，并且由于宇宙中所有物质互相间的引力吸引，宇宙开始向内部坍缩；第二种设想，宇宙可能减慢它的膨胀直至达到一种稳定的状态并保持这种状态。天文学家以及大部分公众似乎赞同第一种设想。从哲学的角度看，其中有些可以使人得到安慰的信念：纵然太阳从现在起再过大约50亿年后会死亡，但是在非常非常遥远的将来的某一天，宇宙可能重新开始坍缩，并且很可能——在完成一次完整的大爆炸重生和大坍缩的循环后——在新的大爆炸中重新爆炸，这可能创造出一个新的地球和重新诞生生命。

逐渐减慢趋于稳定状态的膨胀在科学上很少被赞同，而只是被看做一种可能性。如果宇宙中的质量恰好大到能终止膨胀，但所产生的引力还不足以使万物再次退聚在一起，那么就会出现这种情形。

只有极少数科学家相信还有第三种选择——宇宙膨胀将永远继续下去。实际上还没有人想象过下面这件难以置信的事：宇宙的膨胀速度竟然会变快。然而，珀尔马特不能无视他积累的资料向他披露的事情，他认真地考虑着这种没料想过的可能性。遥远的超新

星——连同它们所在的星系——正以慢于预料中的速度离地球而远去。这些速度慢于更邻近处的星系的退行速度。他断定这只能意味着一件事情：宇宙正在加快它的膨胀。

这个使人困惑的发现产生的原因并不是显而易见的。它需要解决关于时间的概念。下面是一种简明的解释，其中省略了某些细节。当天文学家观测一个有70亿光年远的星系时，他或她正看到的是光线离开它射向我们时的那个星系，也即70亿年前的星系。因此，从观测到的它的红移计算出的星系的速度是70亿年前离我们而去的速度。类似的，10亿光年远的星系的退行速度是10亿年前膨胀的速度。现在，如果远处的星系以比近处的星系慢的速度离我们而去，那么70亿年以前的退行速度——宇宙膨胀的速度——就慢于10亿年前宇宙膨胀的速度。* 换句话说，宇宙正在加快它的膨胀。

珀尔马特感到迷惑。早些年里他已经开展这整个计划，希望能测量出宇宙的*减速*——他从未真正地想到过我们的宇宙一直在*加速*膨胀。关于这样一个结论有些东西很让人烦恼。这时珀尔马特开始思考他正注视着的日落，日落是红的，天空是蓝的——这是每个刚开始学习物理的学生都会述说的瑞利(Rayleigh)蓝天定律。大气层按光的频率不同程度地吸收光的白光谱。红色光，由于它的低频率和长波长，比蓝色光更容易通过尘埃和空气粒子。珀尔马特是一位细心的科学家，而每一位科学家都必须提防数据中可能发生的错误。对于一个准备作出一个关于宇宙的重大结论——也许是将近70年前哈勃

---

* 实际的计算更为复杂。我们观测70亿年前离开所在星系的光。当光离开它的发光源时，发射它的星系实际上离我们约50亿光年远。当它的光到达这里时，同一星系离我们约120亿广年远。这种不一致的原因是空间一直在继续膨胀。在数学上，我们观测到的红移是整个从光离开它的源的瞬间起直到我们接收到它的瞬间所发生的空间伸展的函数(红移并不只依赖盂光源退行的即时速度)。

的发现以来天文学最重要的发现——的科学家而言，尤应如此。

这里使索尔·珀尔马特感到困惑不解的是他的数据的一个明显异常的特征。之前他曾抱有一点希望，希望他的数据是由于通常的观测误差而搀杂讹误。他的小组一直在观测的遥远的星系中应该有某些尘埃，类似于我们在自己的银河中发现的那种尘埃。这些尘埃可能会使他的小组一直在观测的古老的爆炸中的恒星像日落一样呈现红色——然而超新星却是整个可见光谱发亮(红移没有计算在内——它使星的光谱中所有的谱线均匀地移动)。这个现象告诉珀尔马特，在地球上的观测者和他们的那些距大爆炸的年代一半远的时候的爆炸的恒星之间，几乎没有或甚至没有尘埃，因此观测的质量特别地高。必须相信数据告诉他的——宇宙正在越来越快地膨胀。而这意味着一个令人震惊的发现：我们的宇宙是无限的。

“想象一个三维的点阵，”珀尔马特在他宣布他的小组的不寻常的发现后不久对我说，“在每个角落有一个星系。现在想象点阵正在变大。从我们的角落，即我们的星系，到这个点阵的所有其他的角落的距离不断增加着。”增长的速度——在每个角落和它的相邻角落之间正以这个速度形成空间——正在加快。由于空间正被越来越快地形成，无法制止，因此它将永远不断地膨胀下去。我们的宇宙将膨胀至无限。10亿年后，我们与遥远星系的距离将会更远，而在下一个10亿年中，距离的增加比第一个10亿年中还要多，如此不断以至永远。*

---

* 这规则有局部的例外情况。尽管整个宇宙总的在膨胀，相邻的星系可能有途径使它们聚拢在一起。距离我们220光年远的仙女星系是我们最近的邻居(大麦哲伦云和小麦哲伦云不算在内，它们被看做银河的旁系)，它正运行在一条与银河有关的路径上，这将使它在约10亿年后与我们的银河猛烈冲撞。天文学家已经发现由别的星系组成的一些“河”，它们沿着与总的宇宙膨胀的相反方向运行。

数据看来没有错误，信息是清楚的，是向全人类宣布这个消息的时候了。1998年1月，在美国天文学家学会的会议上消息被宣布了。* 全世界被震惊了。人们期待的决不是一个无限的、越来越快地膨胀的宇宙。甚至许多科学家曾暗地里希望有一个自我更新的宇宙，爆炸和坍缩交替发生——一座经历季节变化的宇宙花园。但看上去不是这样，宇宙注定要膨胀并凋亡。** 恒星将走完它们的生命历程，爆炸成超新星或将它们的气体外层抛了出去形成行星状星云。在我们的星系中，新的恒星从死亡的恒星的残留物中诞生，而垂死的恒星内部产生的丰富多样的化学原素正是使生命得以演化的东西。但是，如果膨胀必定会继续下去，并且空间的密度变小，那么在亿万年之后，宇宙最终将会是一个充满中子星和黑洞的星球墓地。

使科学家们困惑的是这样的问题：为什么？这个前所未有的新发现的解释是什么？答案似乎是宇宙中还有另一种神秘的力——从未被直接地观测到的某种东西。这种物理学家称之为负压力或真空能量或就称为“有趣的能量”的东西，反作用于起吸引作用的引力。有某种东西正在推开这些星系——加速它们相互之间的退离。

在1998年1月珀尔马特宣布他的小组的令人震惊的结果的会议上，另一些科学家提出了基于不同分析方法的研究结果具有同样的使人困惑的推断。普林斯顿大学的天文学家内塔·巴考尔和范晓辉，他们研究距离地球70亿光年的巨大的星系团，宣布了也可以隐含宇宙会永远膨胀的结果。根据使用三种不同技术对星系团质量密度的

---

* 两个月后，另一个天文学家小组，在使用珀尔马特的巧妙方法对他们自己的较小规模的数据资料进行分析之后，宣布了类似的结果。

** 广义相对论并不隐含着宇宙陷于绝境后一定会跟随一次大爆炸，然而，如果宇宙再次坍缩，那么量子效应会使得这种结果有可能发生。

研究，内塔·巴考尔和她的同事们发现我们生活在一个小质量的宇宙中。他们所有的研究独立地表明，宇宙的质量密度大概只有为完成从坍缩到新的大爆炸所需要的质量密度的 20%。

也在普林斯顿大学的埃里克·格拉(Erick Guerra)和鲁思·戴利(Ruth Daly)通过对 14 个射电星系的研究，得到了类似的结果。他们的分析再一次指出，宇宙的质量可能小于为在遥远将来的某一天终止膨胀而需要的质量。所有这些在这次会议上提出的研究结果，使一个很久以来被搁置在历史的废物箱中却又使人难以忘怀的科学概念重获新生。

* * * *

宇宙学家和天文学家们在芝加哥附近的费米国家加速器实验室(Fermilab)召开了一次紧急会议讨论这个新结果。1998 年 5 月 4 日的这次会议是由现在在普林斯顿大学的一位声名显赫的年轻宇宙学家保罗·斯坦哈特组织的。来自世界各地的茫然不知所措的科学家们聚集在芝加哥，讨论所报道的宇宙的加速膨胀以及宇宙包含的质量可能太少这个事实。方程能不能适合这些新数据以解释它们？爱因斯坦的引力场方程是科学家们用于这个目的的当然工具。但是它不能解释膨胀的加速——除非把过去的一个项加回到爱因斯坦的方程中去，这个项很久以前被方程的发现人丢弃，并且此后被称为“爱因斯坦最大的错误”。宇宙常数回来了。

第二章　早年的爱因斯坦

“上帝是狡猾的，但他并无恶意。”*

——阿尔贝特·爱因斯坦

宇宙常数是爱因斯坦插入——后来又被移去——他的引力场方程中的一项。这个场方程是爱因斯坦在20世纪20年代发展的广义相对论的结果，是他的研究工作的王冠上的明珠。这是一个如此强有力的，能洞察爱因斯坦之前无人能明白的潜在自然法则的方程，它的预见功能令人惊愕。自它问世以来，每隔10年，这个方程就会以预料不到的方式一次又一次显示它的正确性。一个人怎么会对我们宇宙的秘密了解得如此清楚?

阿尔贝特·爱因斯坦(1879—1955)于1879年3月14日出生于德国西南部斯瓦比亚地区乌尔姆镇一个中等阶层的犹太家庭中，自人们能够记起来的年代起，他的祖先就已经生活在这个地区。当阿尔贝特还是一个婴儿时，他们全家搬到了德国南部的大城市慕尼黑。他的

父亲赫尔曼·爱因斯坦(Hermann Einstein，1847—1902)和与他住在一起的兄弟共同拥有一家小企业。他们两人从事电化学工业，开办了一家小工厂。赫尔曼管理企业的商务，他的兄弟负责工程技术问题。阿尔贝特的母亲是保利娜(科赫)·爱因斯坦［Pauline (Koch) Einstein，1858—1920］。爱因斯坦家还有一个小女儿马雅(Maja)。

年幼时，小小的阿尔贝特就显示了对周围世界的浓厚兴趣。在他5岁的时候，父亲给了他一个指南针，这个孩子就被这个仪器所陶醉，对指针服从一个不可见的场而总是指向北极的方向这个现象十分好奇。在老年追忆往事时，爱因斯坦提到这件小事，认为这也是很多年以后促使他研究引力场的因素之一。6岁到13岁期间，在有音乐天赋的母亲的鼓励下，阿尔贝特上过小提琴课。爱因斯坦成为一个出色的小提琴手，并且终身未停止过拉琴。1886年到1888年期间，爱因斯坦在慕尼黑的公立学校上学。由于州法律关于宗教的要求，他的家庭不得不在家里对他补充进行犹太教教育，尽管家里并没有非常严格地遵守这一点。1888年，爱因斯坦进入慕尼黑的卢伊特波尔德(Luitpold)大学预科，该校的建筑在第二次世界大战中被毁，后来在另一地点重建了这所学校并改名为阿尔贝特·爱因斯坦大学预科。

在大学预科，爱因斯坦显现出他对权威的极大厌恶和对权威的不信任———种他终身都显露的性格。后来在谈到他的学生时代时，爱因斯坦将小学教师比做为军队中的军士，而大学预科的教师则是军

---

* 这是在科学史上最经常引用——翻译得最差——的格言之一。它的德文原句是爱因斯坦在1921年首次访问美国时说的，当时他听到一个后来被证明是假的传闻：已经发现非零的以太漂移。这种漂移将会危及整个狭义相对论的正确性。按字义翻译，这句话说："上帝是狡猾的，但他并无恶意。"然而，引用时通常被译为："上帝是难以捉摸的，但他决无恶意。"我相信正确的翻译更能表达爱因斯坦与他的上帝的私人关系。

队中的尉官。正是这种对压抑的普鲁士式的权威的厌恶，使得年轻的阿尔贝特在几年后放弃他的德国公民身份而申请瑞士公民资格。他常会忆起大学预科使用的充满恐惧、压力和权势的管教方法。正是在大学预科，爱因斯坦教会自己要质疑权威——事实上，质疑一切已接受的信念；如某些传记作者推测的，这种观念可能还对他的科学生涯产生了影响。1891年，另一件决定性的事情发生了，它就像指南针引起的兴奋那样深深地影响着爱因斯坦。爱因斯坦发到一本论述欧几里得几何的书作为他的一门课程的教科书。他在开学前拿到了这本书并饶有兴趣地读完了它。爱因斯坦开始怀疑欧几里得几何学的假定。20年后，根据我们生活的空间是一个非欧几里得空间的观点，他开创了一个革命性的理论。

1894年，爱因斯坦一家移居意大利。他的父亲在慕尼黑的事业失败以后希望在那里建立一个成功的企业。父母亲将马雅带在身边，而把阿尔贝特留在德国，与一个远房亲戚生活在一起，以便他能完成大学预科的学业。然而，爱因斯坦自己决定离开学校，想与在意大利的家庭团聚。他不能忍受大学预科的那些苛刻专横的纪律，他厌烦那些被特别强调的课程：古希腊语和拉丁语。他渴望学习更多的数学和物理——他自幼就感兴趣的学科。6个月后，爱因斯坦设计了一场逃亡。一位医生给了他一份证书，说他由于体力不支需要离开一段时间回意大利家中。看来似乎让他离开反而使学校感到宽心，因为他的行为正引起学校纪律的混乱。

爱因斯坦非常喜欢意大利。盛行的文明——对使得生命值得生存的事物的赞美——与他鄙视的条顿人的秩序形成鲜明的对照。他在遍布意大利北部的博物馆中看到的奇妙的艺术作品令他陶醉。爱因斯坦甚至越过亚平宁山脉从米兰一直徒步旅行到利古里亚地区的地

中海沿岸的热那亚。但是，赫尔曼的企业又失败了，他必须把他的儿子推回到现实中去，让他取得学校的毕业文凭，这将使他能继续他的学业，维持自己的生活。年轻的阿尔贝特相信自己出色的数学和物理成绩能让他无需他已经擅离的大学预科的毕业证书而被大学接纳。但是他错了——如果没有预科的毕业证书，他就不可能进入任何大学，这一点是明白无疑的。

1895年，爱因斯坦在瑞士理工学院(它的德文首字母缩略词为ETH)的入学考试失败，他当时曾希望以通过入学考试替代毕业证书的办法入学。他的数学成绩非常出色，但是在其他学科，诸如语言学、植物学和动物学，他的成绩都低于大学的要求。虽然如此，出于对这个年轻人的数学知识的深刻印象，大学校长建议他就读位于瑞士阿拉姆的州立中学以取得必需的毕业证书。爱因斯坦怀着惊惶的心情进入阿拉姆镇的这所学校——他仍然留有因德国大学预科中学生们受到的不可理喻的机械式待遇而遭受的精神创伤。然而，使他惊奇的是，他发现瑞士的学校是完全不同的。在这里军事化般的纪律不像在德国学校中那样被注重。在这里，他能够松弛一下，好好学习，还能交朋友。他住在他的一个老师家中，并且和这个老师的儿子和女儿成了好朋友，他和他们一起到山区去旅游。在阿拉姆镇的这所学校读了一年后，爱因斯坦取得了毕业证书并申请就读瑞士理工学院，这一次他被录取了。他决定学习数学和物理，并准备将来做教师。用简明的数学表达来解释世界，这种想法使他着迷。对于他来说，物理学是一门目的在于发现一个适当的数学方程去捕获真理的科学。

1896年10月29日，爱因斯坦迁居苏黎世并在瑞士理工学院就读。在这里，他遇见两位他生命中的重要人物，两个瑞士理工学院

的同学：米列娃·玛里奇(Mileva Maric)——后来成为他的第一位妻子——和马塞尔·格罗斯曼(Marcel Grossmann)，一位数学家。他的工作帮助爱因斯坦在毕业后的几年中发展了他的相对论。在爱因斯坦进入瑞士理工学院的第二年还遇到了米凯莱·安杰洛·贝索(Michele Angelo Besso)，他成为爱因斯坦的一位终身挚友，并在爱因斯坦初创狭义相对论时为他做宣传。

在瑞士理工学院的第一年中，阿尔贝特·爱因斯坦作出了他的科学生涯中的一次决定性的转向。之前，他一直对数学有兴趣，并对他在这个学科的知识感到自豪。然而，在理工学院，他认定他最感兴趣的是物理学，而数学只是使物理定律定量化的方法。数学是一种工具，它以简明的方式记录由物理科学发现的宇宙定律。但是，爱因斯坦对瑞士理工学院的教学并不满意。物理学教授们讲授一些旧理论，而不去讨论这个领域中的新发展。爱因斯坦开始做他一辈子都坚持做的事——通过独立看书和研究来自学理论。由于他不太注意听课，结果招致许多教师的反感。数学课的情况更为糟糕。由于爱因斯坦已经认定数学只是一种工具，而其本身不是一门有趣的学科，他几乎不去听课。这种行为在赫尔曼·闵可夫斯基(Hermann Minkowski，1864—1909)授课期间最为明显，闵可夫斯基是一位原籍俄罗斯的著名数学家，这个年轻学生对他的课程漫不经心的态度使他非常厌恶，以致他后来将爱因斯坦说成是“一条懒狗”。如同命中所注定的，在爱因斯坦从瑞士理工学院毕业后的几年中创立他的狭义相对论时，正是闵可夫斯基创立了描述相对论物理学的一整套数学。

爱因斯坦对他在瑞士理工学院的课程的这种漫不经心的态度对他的毕业产生了负面影响。正如今天每一个大学生都知道的，听课并取得好分数是重要的，但是对于一个人的前程至少有一件事也是重要

的——得到教师的出色的推荐信的能力。在爱因斯坦的那个年代，这种要求甚至更为重要得多。为了在有声望的大学里继续研究生学习，一个大学生必须得到一位这个学生曾作为助手为之工作过的教师的推荐。使爱因斯坦大为失望的是他的教授中没有一个同意接纳他。爱因斯坦不得不离开瑞士理工学院并寻找一个作为教师或助教的职位。由于他的父亲经济困难，以及他的家庭甚至已无力在他求职期间给他丝毫资助，爱因斯坦的境况更为窘迫。

爱因斯坦在1900年的夏天从瑞士理工学院毕业，但由于他未能在该大学得到助教的位置，他必须努力寻找别的谋生方法。在以后的几年中，他在瑞士得到过一些临时的教师职位，但没有一次是长期的。

1902年6月16日，已取得瑞士公民资格一年多的阿尔贝特·爱因斯坦被瑞士伯尔尼专利局雇用，这个职位是他的好朋友马塞尔·格罗斯曼的父亲安排的。这个职位开始是临时的，但在1904年成为永久职位。他被冠以技术专家的头衔，他的职责是评估专利提案的价值。在这之前的两年中，爱因斯坦的生活发生了变化：1902年，他父亲在米兰去世，1903年，阿尔贝特和米列娃结婚。米列娃跟随他来到了伯尔尼。不顾爱因斯坦母亲的反对和她对儿子的未婚妻的厌恶，他们结婚了。

瑞士专利局为这位年轻的科学家提供了一个他感兴趣的机会。他似乎很满意他的工作。爱因斯坦终身都十分爱好摆弄为特殊目的而发明的装置和尝试估量它们的用处。这一职位给了他一些空间时间——他很好地用来学习和研究的时间。在晚年，爱因斯坦向年轻的研究工作者们建议，一个有创造力的科学家最好是找一个能有一些空间时间搞研究的低级的或“非脑力的”职业，而不是去找需要教

书、为单位服务和懂校园权术的传统的大学职位。

爱因斯坦在瑞士专利局的大部分时间用于读书和做研究。与某些他的传记作者所说的相反，爱因斯坦很清楚地了解他的同时代的以及更早一些的物理学家和其他科学家的工作，他也阅读包括伊曼努尔·康德(Immanuel Kant)、奥古斯特·孔德(Auguste Comte)、大卫·休谟(David Hume)和尼采(Nietzsche)在内的著名哲学家的著作。在物理方面，对爱因斯坦影响最大的是伽利略·伽利莱(Galileo Galilei, 1564—1642)、恩斯特·马赫(Ernst Mach，1838—1916)和詹姆斯·克拉克·麦克斯韦(James Clerk Maxwell，1831—1879)的著作。伽利略是考虑运动系统的相对性的第一人，爱因斯坦在他的开创性工作中常常提及伽利略参照系。奥地利物理学家恩斯特·马赫对伊萨克·牛顿(Issac Newton，1643—1727)的力学做了仔细的分析。马赫注意到，牛顿根据几条简单的原理组织了对运动的观测，然后由此作出预言。但是，马赫提出一个问题：是否只要牛顿叙述的经验是正确的，这些预言就是惟一正确的。马赫强调说，在科学中我们必须遵循一种节省思维的原则——建立的模型应该是极其节俭的，包含尽可能少的参数。这是数学中的“奥卡姆剃刀”*——“最简单的理论最有可能是正确的理论”这条众所周知的原则。在数学科学中，这意味着应该选择最简单的模型或方程来描述自然界中的现象。在爱因斯坦的主要工作出现之前，马赫就批评牛顿对绝对空间和绝对时间的依赖。在这方面，马赫的关于科学的哲学思想具有相对论的性质，尽管由于当时(19世纪70年代)还没有直接的观测证明原子的存在，马赫是原

---

* 奥卡姆剃刀，指将论题尽量简化的原则。系英国经院哲学家，逻辑学家奥卡姆(Occam，1285—1349)提出的。——译者

子论的早期反对者。在马赫看来，所有的科学的结论都是从物理的观测中提取出来的。爱因斯坦吸取马赫的坚持以经验为根据的观点，使物理学相对化和精确化，并且将牛顿的理论作为当涉及的速度是日常生活中遇到的那种速度时的相对性的极限而保留下来。

对爱因斯坦的工作影响最大的科学家是苏格兰物理学家詹姆斯·克拉克·麦克斯韦。麦克斯韦开创了场(field)的思想，这种思想对于阿尔贝特·爱因斯坦的整个工作是必不可少的。麦克斯韦的理论通过一个描述力场的方程组解释了电磁现象，力场就像当你将一块磁铁置于一张上面散布着铁屑的纸下面时你所看到的许多线条。铁屑自身会以清晰的方式排成从一个磁极到另一个磁极的一行行线条。这个看得见的图形正是磁铁产生的磁场的描绘。麦克斯韦的工作为科学开辟了结束如以太之类的虚构概念的道路，以太曾被认为是光在空间运动所凭借的不可见的介质。麦克斯韦的工作可以被视为爱因斯坦相对论的前驱，在相对论中场是该理论的基本要素。不过另一些科学家也对爱因斯坦的知识储备作出了贡献，在爱因斯坦受雇于瑞士专利局期间，曾将这些知识用于建立狭义相对论。这些科学家包括海因里希·赫兹(Heinrich Hertz，1857—1894)；荷兰物理学家亨德里克·洛伦兹(Hendrik Lorentz，1853—1928)，他的关于变换的工作在解释狭义相对论的数学中起了关键性的作用；伟大的法国数学家亨利·庞加莱(Henri Poincaré，1854—1912)，以及另外几位。

爱因斯坦在1905年提出了狭义相对论，这一年里他还完成了另外3篇也发表在那使人惊愕的一年里的开创性的论文：关于布朗运动的论文、关于光量子理论的论文，以及关于分子大小的博士学位论文。爱因斯坦关于相对性的论文改变了我们的运动、空间和时间的概念。空间再也不被视为绝对的，而是与参照系有关的。参照系的

思想与三个世纪以前伽利略提出的类似概念相呼应。伽利略考虑过如果一个球从一艘船的桅杆顶上掉下来，与一个在陆地上从同一高度掉下来的球相比会发生什么现象。在第一种情形下，参照系——船——是运动着的，而在第二种情形下，参照系——大地——是不动的。伽利略问：球会发生什么现象？它会笔直地下落到运动着的船上，还是会描绘出一条向后的路线，仿佛它是在坚实的地面上掉下来的？爱因斯坦接受运动的参照系这种想法并且将它带领到一片尚未开发的领地——以接近于光速的速度运动着的物体。

在这个相对论的世界中，爱因斯坦已经告诉我们只有一样事物是绝对的：光速。所有别的事物都和这最终的速度极限有关。空间和时间被统一起来给我们以时空。已经证明，双胞胎中在高速的太空飞船上旅行的一位，比留在地面上的另一位老得慢。当物体的速度接近光速时，运动着的物体会改变而时间会膨胀。时间变慢。如果有什么东西能比光还快(相对论是不允许这种现象的)，那么它将走进过去。空间和时间不再是刚性的——它们是塑性的，与物体的速度接近光速的程度有关。

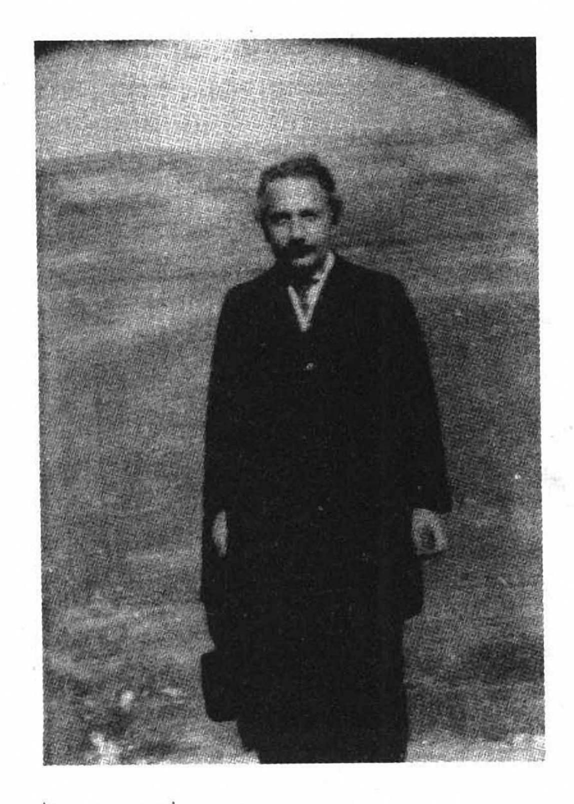
时间的绝对性和普遍性曾经是物理学神圣的信条，没有人对这个假定怀疑。时间是处处相同的，时间的流逝是稳定不变的。爱因斯坦证明这些假定根本是不对的。不变的量是光速——任何别的东西，空间和时间，都要围绕着这个宇宙的常量调节它们自己。爱因斯坦的狭义相对论使得历史上一个极使人困惑的否定性实验结果——迈克耳孙-莫雷(Michelson-Morley)以太探索*——变得显然。

詹姆斯·克拉克·麦克斯韦为我们的物理学作出了如此多的贡

---

* 1881年测定光速不受媒质影响的迈克耳孙-莫雷实验。——译者

献，他的理论鼓舞着爱因斯坦，但如同在相对论之前的世界上其他的科学家一样，他也是起源于古希腊的以太论的信仰者。在他为 1878 年版的《不列颠百科全书》撰写的一个条目中，麦克斯韦写道："整个空间到处弥漫着以太。"但这个以太是什么？人们认为光和其他的射线和粒子需要凭借某种媒质来运动。这类媒质从未有人看到过或感觉到过，但不管怎样，它必须存在。这个假设如此盛行，一些受人尊敬的科学家也非常认真地接受了它，著名的美国物理学家艾伯特·A·迈克耳孙(Albert A. Michelson，1852—1931)就是其中的一位。1881 年时他正在柏林实验室工作，得悉麦克斯韦在 1879 年写的一封信，信中麦克斯韦询问是否能够用天文学的测量法来探测太阳系通过以太的速度。迈克耳孙是测量光速的专家。这引起了他的兴趣。



阿尔贝特·爱因斯坦，1921 年 11 月。

他做了一系列提高精确性的工作，目的在于探测出光速的改变，这种改变将表明存在以太漂移。大部分实验是在他回到美国以后与美国化学家爱德华·W·莫雷(Edward W. Morley，1838—1923)在1886年共同完成的。迈克耳孙和莫雷既在地球旋转方向上，又在反方向上测量了光速，期望能发现光速上的差别。但是他们没有发现这种差别。没有以太漂移，因而显然不存在以太。1907年迈克耳孙成为获得诺贝尔奖的第一位美国科学家。那时，爱因斯坦的狭义相对论已经向世界解释了为什么迈克耳孙和莫雷会得到他们未预料到的结果。

还不清楚爱因斯坦是什么时候知道迈克耳孙-莫雷实验的，这个实验发现了考虑地球转动和不考虑地球转动时测得的光速之间的令人吃惊的无差异。爱因斯坦用纯理论的思考——他的“思想实验”——认定：不管光源如何快地迎着或背离观测者运动，光的速度总保持不变。爱因斯坦的传记作者奥尔布雷克特·弗尔辛(Albrecht Fölsing)描述了1905年5月中旬的一天，那天在伯尔尼瑞士专利局的爱因斯坦终于意识到狭义相对论的原理。* 那是美妙的一天，爱因斯坦后来在1922年东京的一次演讲中回忆道。他和他的朋友米凯莱·安杰洛·贝索花了许多小时一起讨论空间和时间的问题，然后，突然的，他想到了答案。下一天，招呼也不打，爱因斯坦猛地一把抓住他的朋友，向他解释相对论的原理：“谢谢你！我已经完全解决了问题。对时间概念的分析就是我的答案。时间绝不能绝对地确定，时间与信号的速度之间有着不可分割的关系。”爱因斯坦向贝索解释同时性的思想。在相对论中，时间不再是处处相同的，爱因斯坦用伯尔尼的钟楼和邻村的钟楼来说明他的观点。不变的不是时间，也不是空

---

* A.Fölsing，*Albert Einstein*，New York：Penguin，1997，p.155.

间——而是光速。狭义相对论解释了这一切。但是，如果探测到以太，那么又怎么解释呢？多年以后，在1921年，当时相对论已被大多数人接受，正是在听说有这样一个实验的传闻时，爱因斯坦说了他这句现在很著名的话："上帝是狡猾的，但他并无恶意。"这句话镌刻在普林斯顿大学数学系的一间休息室的壁炉上方的石壁上——表明狭义相对论的永恒性。

第三章　布拉格，1911 年

"如果爱因斯坦的理论被证明是正确的，我预料会这样，那么他将是 20 世纪的哥白尼。"

——马克斯·普朗克* **

爱因斯坦认为相对论——他已经建立的"狭义的"相对论——在无巨大质量的物体的环境中是正确的。质量，还有引力，则需要另一种理论。现有的引力理论是由伊萨克·牛顿三个世纪之前创立的，但是一旦理解了狭义相对论，那么很清楚，牛顿的理论只是一种极限情形，对于速度远远小于光速的世界是正确的。因此，爱因斯坦得出结论：有两种理论，即狭义相对论和牛顿的引力论。在特定的极限情形下，它们都是对的：牛顿理论在低速的世界中是正确的，但是在光以及它的速度——宇宙极限——起作用的宇宙中必须加以修正。类似的情况是，当引力不重要时，狭义相对论是正确的，然而这个理论也必须修正方能在由大质量物体支配的宇宙中也能成立。

如果光速是绝对的，而时间本身是相对的，那么当狭义相对论适用时，即当速度接近于光速时，牛顿定律在这种条件下不可能成立。在这些情形下，时间成为相对的，爱因斯坦推论出支配物体运动的法则不可能是过去的牛顿定律。这两种理论——牛顿引力论和爱因斯坦的狭义相对论——必须合并以给出一种广义的相对论。这将是一种关于相对性和引力的理论。但是如何才能做到这一点呢？

1907年，两年前已经推导出狭义相对论原理的爱因斯坦将他的注意力转向了引力问题，当时他28岁，仍在伯尔尼的瑞士专利局工作，是一个(前一年刚从三级提升的)二级技术员。

1907年11月的某个时候，阿尔贝特·爱因斯坦正坐在他在伯尔尼专利局的椅子中，思考着狭义相对论所隐含的东西，两年前他已经完成这个理论的创立。他后来在他的1922年京都演讲中用下面的这些话描述这个奇特的瞬间："突然，一个想法冒了出来：如果一个人自由地下落，他将不会感觉到他自身的重量。这使我大吃一惊。这个简单的想法给我极深刻的印象，它激励我研究引力理论。"爱因斯坦向他的也在瑞士专利局工作的密友米凯莱·安杰洛·贝索这样描述这个新发现："我生命中最快乐的想法。"爱因斯坦试图在相对论中解释引力。最终这导致他创立广义相对论——将引力结合进去的相对论。

* * * *

---

* 见1910年致布拉格教师委员会的信。

** 马克斯·普朗克(1858—1947)，德国物理学家，量子物理学的开创者和奠基人，因发现基本作用量子获1918年诺贝尔物理学奖。——译者

从1907年直到1911年6月的4年中，爱因斯坦不可思议地对引力问题一直默不作声。1911年，他从瑞士迁居到布拉格。现在还不知道在这4年中爱因斯坦是否在研究引力问题。在这些年中，他发表了关于黑体辐射和临界乳光的论文，但是，他是否将重要的引力问题及它与相对性的关系记在心上？这位狭义相对论——使物理学家了解宇宙的方式发生革命性变化的理论——的发现者仍然处于职业不稳定的境况，尽管那时他已经对整个物理学领域作出了巨大的贡献。爱因斯坦的工资总是很少的，他甚至试图通过在伯尔尼大学教书来增加收入，这是一种被他视为不愉快的负担。晚年，他为他当时没有足够的钱给他家添置一只钟而感到悲哀，尽管在他的脑海中有许多的在空间各处放置着的钟，他想象这些钟以不同的速度飞越，由此推断空间和时间是相对的。

1910年4月4日，当时在苏黎世当副教授的爱因斯坦写了一封含意隐晦的信给他的母亲。“我极有可能接受来自一所重要大学的聘请去当正教授，薪水比我现在要多得多，但现在还不允许我说出这是什么地方。”*爱因斯坦将同一件事告诉了他的某些同事，那一年末，秘密揭开了：这所大学是布拉格德语大学。于是，在青少年时已经放弃德国籍成为瑞士籍人，并且完全是在瑞士的土壤上创立狭义相对论的爱因斯坦现在准备去一所德语大学，开始了最终把他带回德国，带回他深感遗憾过的德国首都——柏林的历程。

布拉格德语大学有着一段不寻常的历史，这是一段反映那时的波希米亚首都种族集团之间的悲惨状况的历史。这所大学是东欧最古老的一所大学，19世纪时，它既聘用捷克教授也聘用德国教授。然

---

* 信重印于A. Pais, *Subtle Is the Lord*, New York: Oxford University Press, 1982。

而，这两个群体彼此从未能融洽相处——甚至到了德国教员不与捷克同事交流专业上的信息这种程度。1888年，奥匈帝国皇帝判令这所大学应该分拆成两半：德语的和捷克语的各半。这次分拆引起了这两部分教员之间进一步的不和，并且使两个群体的敌意更为增加。爱因斯坦是由德语大学聘用的。

布拉格是哈布斯堡王朝的重要城市和皇帝借以统治奥匈帝国的中心维也纳—布达佩斯—布拉格三角形的一角。布拉格对爱因斯坦具有吸引力，吸引力如此之强以致尽管他知道他可能会与科学研究的中心隔绝，尽管苏黎世大学为了与布拉格的卡尔-斐迪南大学许诺给他的工资竞争而允诺提高他的工资，他都置之不顾而坚定地决定搬迁到那儿。爱因斯坦没有被反犹太现象吓倒，这种现象从委员会对他的种族出身的讨论中得到印证。在他的申请过程中这一点引起了他的注意。他被要求在他的教授申请中说明他的宗教信仰，大学不接受他最初作为回答写下的“没有”。教员任职的任命书由弗兰茨·约瑟夫(Franz Josef)皇帝本人颁发，大家知道皇帝不会对在申请书中没有说明宗教信仰的人给以任命，爱因斯坦让步了，皇帝颁发了任命，任职于4月1日生效。很可能是由于宗教事件的推动，以前从不表明宗教感情的爱因斯坦加入了布拉格犹太社团。人们还知道他访问了布拉格著名的老犹太人墓地，这块墓地的第一次起用可追溯至公元5世纪。他还察看了16世纪天文学家第谷·布拉赫(Tycho Brahe)的朋友拉比*勒韦(Löwe)的墓上面的碎裂石碑。

从他给朋友们的信来看，似乎爱因斯坦在布拉格并不快乐。他常常抱怨那些管理学校的德国官员官僚主义的拖拉的公事程序和普鲁

---

* 拉比(Rabbi)，犹太教神职人员，相当于基督教中的牧师。——译者

士式的刻板。他还感觉到学生不如他在瑞士教过的学生那样勤奋和聪明。不管他喜不喜欢布拉格，爱因斯坦似乎甚至在布拉格的社会生活中也留下了他的影响。在彼得·德梅茨(Peter Demetz)的《黑色和金色的布拉格》一书中，他写到过爱因斯坦喜欢在那里消磨他空闲时光的咖啡馆*。德梅茨写道，即使是咖啡馆在布拉格也分成捷克人光顾的和德国人光顾的。斯拉维亚咖啡馆是布拉格的窗口，一些有名气的捷克的语言学家和作家喜爱的常去之地，他们中间有托马斯·曼(Thomas Mann)。高谈阔论的新闻记者们通常聚集在后面的墙角落处，而陆续而来的天主教徒们则聚集在靠人行道的正门前。就在这个赶潮流的商店里，在阳光明媚的下午，常常可以见到爱因斯坦坐在那里，他和大学的同事们谈论德国或者在纸上满腹经纶地写满方程式。正是在这个出现过卡夫卡(Kafka)**，遍布着咖啡馆以及奥匈帝国政府和耶稣会之间不断的勾心斗角的城市布拉格，爱因斯坦向着他的广义相对论跨出了重要的第一步。

爱因斯坦在布拉格要解决的第一个概念是他4年前在伯尔尼首次叙述过的等效原理。爱因斯坦设想有两个参照系：一个是带有引力场的静止的参照系，另一个则是匀加速的无引力场的参照系。爱因斯坦在那年发表的一篇论文中指出，在这两个参照系中牛顿定律必定是相同的，等效性应该通过一种新的引力理论导出。因而，他的目标是寻找一种新的理论——一种同时包含引力和相对性概念的理论。

爱因斯坦在布拉格推导出的第二个原理是引力的红移。他从等

* Peter Demetz, *Prague in Black and Gold*, New York: Hill and Wang, 1997, p.354.

** 卡夫卡(1883—1924)，奥地利作家，布拉格德语大学博士。——译者

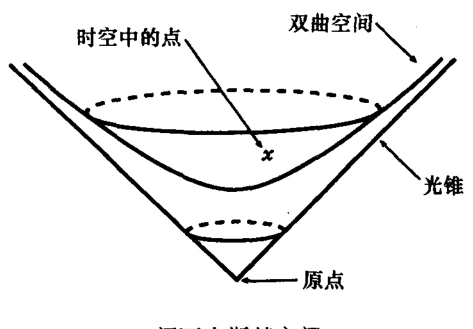
效原理出发推断大质量物体发出的光射线将降低它的频率并向光谱的红端迁移。在狭义相对论中由于光源离开观察点的速度也会发生光线的红移。1911年，爱因斯坦就知道狭义相对论应该结合到引力理论中去，但是他不知道如何进行。当时他缺少推导引力怎样引起辐射红移的工具，然而他能证实由引力产生的红移必定存在。

当爱因斯坦发现狭义相对性原理时为他所用的数学有：洛伦兹变换和闵可夫斯基创造的关于空间—时间的数学。闵可夫斯基的数学将空间的三个独立的方向与一个时间方向紧密结合在一起。这个设计可以统一地处理爱因斯坦的时空的四个分量，其中事件以及过去、现在和将来之间的联系是通过四维空间中的圆锥来表达的。下图显示的是二维的类似情形：光锥反映从原点出发的光的速度不变性。在光锥上，到原点的空间距离等于逝去的时间。图中的双曲面是所有到原点的空间—时间距离的平方都相等的点组成的集合。闵可夫斯基的度量可以用来测量时空中的距离。

这里，数学的应用是新颖的，但是数学本身不是非常复杂的，因为它的基本要素——称为向量——人们已经早就很了解。但是在布拉格，在爱因斯坦重新想到将引力概念结合进狭义相对论时，他意识到他需要更厉害的数学，要比在狭义相对论和他懂得非常少的一些领域中使用的数学厉害许许多多的数学。

引力使空间成为非欧几里得的，因而，爱因斯坦需要一些新的几何工具来处理这种弯曲。爱因斯坦现在必须掌握非常复杂的数学。他开始了他的探索历程中最艰难的阶段，这种努力要求他调动所有的物理直觉并将它们与有力的数学方法结合起来。

爱因斯坦的长途旅程中下一步所需要的工具正隐藏在布拉格一览无遗的景色中，就在一位很有天赋但未得到应有赏识的数学家身上。



闵可夫斯基空间

乔治·皮克(Georg Pick)要比爱因斯坦大 20 岁，在爱因斯坦到布拉格就职不久他们两人就见过面。布拉格的习惯是大学里每个新来的教授应上门拜访系里所有的其他教师。由于爱因斯坦在学术界已经很有名，系里的 40 多个教师都充满期望地等待着他的来访。* 作为这个有着使人着迷的建筑和历史的城市的新来者，开始几次的对同事的拜访使爱因斯坦感到很愉快，因为每一次访问总将他带到这个城市中他未去过的又很有趣的地方。然而，不久他就厌倦了这种闲聊，这种闲聊使他离开广义相对性，他停止拜访。当按名单往下看时，由于乔治·皮克不是被爱因斯坦轻视的教授之一，爱因斯坦大概是在字母 "P" 以后才停止拜访的。皮克和爱因斯坦成了好朋友，一起长距离散步，讨论数学。皮克是恩斯特·马赫故事的提供者，马赫在爱因斯坦到来之前曾在这所大学工作过，他的思想加速了爱因斯坦狭义相对论的出现。皮克像爱因斯坦一样是一个不错的小提琴手。通过他，爱因斯坦加入了当地的四重奏演出小组。但是，皮克也是爱因斯坦创立他的广义相对论所需要的数学方法的一位专家。皮克很熟

---

* 菲利普·弗兰克(Philipp Frank)，爱因斯坦的最好的同时代的传记作者，在《爱因斯坦：他的生平与时代》(纽约，克诺夫出版公司，1957 年)一书中详细地写到过这个故事和爱因斯坦生命中别的奇闻。

悉两位意大利数学家格雷戈里奥·里奇(Gregorio Ricci，1853—1925)和图利奥·列维-齐维塔(Tullio Levi-Civita，1873—1941)的工作。早在1911年，皮克可能已经试图指引爱因斯坦学习里奇和列维-齐维塔的数学，但是，爱因斯坦对这个有用的忠告却不以为意，并且直到他离开布拉格前依然如此。假如他当初看过这两个意大利人的数学论文的话，爱因斯坦可能会省去好几年的艰苦研究。

爱因斯坦在布拉格所作的关于引力的一般理论的第三件工作是下面的原理：大质量物体不仅影响刚体而且也影响光。爱因斯坦在这里关于这个原理形成了他的初步想法，后来表明这个原理等价于牛顿几个世纪前曾用过的原理。他的光经过大质量物体近旁必定弯曲的推断相当于空中飞行物体当靠近大质量物体时将改变它的路径的牛顿原理。正是这同一个原理使美国国家航空和航天局得以通过使宇宙飞船绕行星旋转来改变它的方向。在光不是射线而是粒子的假定下，理论给出了当光经过大质量物体的近旁时光线将发生的偏折量。对于一个具有与太阳相同质量的物体，如果光线恰好擦过它的边缘，爱因斯坦算出偏折量为0.83弧秒(角分离的一种测度)。似乎爱因斯坦有计算上的误差，因为他通过计算应该得到的值是0.875弧秒。后面这个值仍然只是偏折的正确值的一半，这个正确值是4年后爱因斯坦用他完成的广义相对论得到的。

在取得一些进展和推导出某些原理后——尽管他还没有完成新理论的研究——爱因斯坦强烈地感到他需要有他的理论发现的物理证明。光线偏折是他还在瑞士的时候就知道的事，但是，那时他相信这种偏转效应太小，永远不可能被察觉。他和别的一些科学家谈起过他相信光线会受到引力的影响，不过大概没有办法从实验上确认这种效应。在布拉格，爱因斯坦对这个问题有了第二种想法。一当他

手头有了一个实际的数字(唉，一个错误的数字，不过仍肯定了光线的偏折)，他就在想，是否天文学家能够以某种方式测量这种效应。他有兴趣于得到一个对他尚未成熟的引力理论所预言的现象的证明。如果光的弯曲能被观测到，那么将为他的理论提供极受欢迎的证明。

爱因斯坦所不知道的是，1801 年，一位德国天文学家约翰·格奥尔格·冯·佐尔德纳(Johann Georg von Soldner)也有过相同的想法。他试图将牛顿的引力理论应用于光线，仿佛它们是大质量物体那样。佐尔德纳使用了牛顿散射理论，这种理论假定光由小粒子组成。对一个世纪后爱因斯坦提出的同一个问题，佐尔德纳发现光线在接近太阳表面时将偏折 0.84 弧秒，这惊人地接近于爱因斯坦的那个受误差影响的数字。佐尔德纳的数字与真正的牛顿值 0.875 弧秒之间的偏离可能起因于对太阳质量的估计不正确。佐尔德纳的工作在 1921 年前一直未受到物理学家的注意。

在他关于光线偏折的论文中，爱因斯坦提出：这个现象的证据可以由天文学家寻找。1911 年的夏天，布拉格的卡尔-斐迪南大学的一个学生利奥·W·波拉克(Leo W. Pollak)旅游到柏林并访问了柏林天文台。在那里，他遇到了埃尔温·芬莱·弗罗因德利希(1885—1964)，后者是天文台中最年轻的助手。弗罗因德利希于 1885 年生于德国比布里希，父亲是德国人，母亲是苏格兰人。在格丁根大学获得博士学位后，弗罗因德利希在柏林天文台谋得一个职位。波拉克在遇到弗罗因德利希时对他提起爱因斯坦对天文学家没有采纳他关于光的偏折可以由实验探知的建议感到失望。波拉克对爱因斯坦论文中的想法的描述引起了弗罗因德利希的兴趣，他提供了帮助。

在波拉克来访后不久，弗罗因德利希写信给在布拉格的爱因斯坦并答应对经过木星附近的星光做一测量来弄明白它是否因行星的引力

而偏折。这种尝试失败了，9月1日，爱因斯坦写信给弗罗因德利希，感谢他继续努力并对没有比木星更大点的行星存在这个事实感到痛心。尽管实验失败了，但是两人之间的合作持续了许多年。

爱因斯坦于1912年4月15日至4月22日在柏林皇家天文台度过了一周，拜访了弗罗因德利希。1997年，柏林的马克斯·普朗克科学史研究所的于尔根·雷恩在《科学》杂志上报道了他和他的同事们对爱因斯坦在他访问期间所使用的一本笔记本所作的研究成果。这本笔记以前未曾披露过。* 在日常约见活动的注记中，爱因斯坦写下了他刚得到的惊人发现的要点：引力透镜效应。当遥远星球或星系发出的光线途经一介于其间的星球或星系到达观测者时会发生这种效应。爱因斯坦知道会发生的那种光线弯曲可以以对称的方式出现，光线都环绕着那个介于中间的天体弯曲。这种效应使光线聚集起来，就像光线通过一块玻璃透镜时会聚集起来一样。因此，来自遥远星球的光可以被位于观测者和遥远星球之间的星球提供的"引力透镜"增强，使观测者得以更清楚地看见那颗遥远的星球。今天，天文学家利用引力透镜观测非常暗淡的遥远星系。这些星系发出的光线碰巧经过近一些的星系并且被它们聚集起来。然后再使用计算机清理被引力透镜变形过的光。现在知道爱因斯坦并没有将他1912年的这个发现看得太重要，因为他认为他所发现的这种效应永远不会被观测到。

1936年，在一位捷克业余科学家鲁迪·W·曼德尔(Rudi W. Mandl)不断的催促下，曼德尔曾向他请教这种效应是否是可能的，爱因斯坦向《科学》杂志送交了一篇描述他对这种效应理论上论证的论

---

* Renn, J., et al., *Science*, January 10, 1997.

文。现在还不清楚爱因斯坦是否真的记得他在24年以前在他遗留在柏林的一本笔记本中已经推导过这个理论。从爱因斯坦在1936年留下的笔记中，似乎他曾重新推导了一遍整个理论。在1936年给《科学》杂志编辑的一封信中爱因斯坦写道："以前某个时候，曼德尔曾访问过我并要求我发表一点计算的结果，这些计算是我应他之请而做的。这个注记是遵照他的愿望而写的。"接着在给编辑詹姆斯·卡特尔(James Cattell)的一封更为私密的信中爱因斯坦写道："我也感谢你对这篇小论文给予的合作，这是曼德尔先生逼我写的。它没什么价值，但是却使这个可怜的家伙高兴。"1979年，引力透镜效应首次被天文学家们观测到，并带来了巨大的兴奋。今天，这种效应由于其本身的重要性而被研究并且还被用做对太空深处进行天文观测的重要工具。

*　*　*　*

在爱因斯坦到达布拉格后不久，他就收到他曾求过学的苏黎世理工学院正教授职位的邀请。爱因斯坦喜爱他移居的瑞士，所以在定居布拉格后不久，他在一年后最终离去是预料中的必然结局。或许在那儿短暂的逗留使爱因斯坦在科学和实验方面变得更为大胆，他所选择的全力以赴的课题将需要好几年的工作才能完成。菲利普·弗兰克刚好在爱因斯坦离开之前来到布拉格大学，他讲述了许多关于爱因斯坦在布拉格的那种差不多梦幻般的日常工作的有趣的轶事。从大学给爱因斯坦安排的办公室望下去的地方像一处美丽的修剪过的绿色公园。透过窗户看出去，尽管沉浸于对引力问题的思考，爱因斯坦还是注意到了在早晨只有女人在公园里散步，而在下午就只有男人

散步。爱因斯坦对这种现象感到迷惑，就向别人请教，下面的公园究竟是怎么回事。他被告知这根本不是公园——这是精神病院的操场。后来他以公园里的这些人为由和同事们开玩笑说，他们是不愿意从事量子理论的疯人。(爱因斯坦曾长期钻研量子理论。在提到量子理论时，由于它的概率论的性质，爱因斯坦后来说了他著名的一句话："我永不相信上帝会和世人掷骰子。")

广义相对论——新的引力理论——不是爱因斯坦在布拉格的一年中能解决的问题。为完成这个理论，他将需要另一个5年——需要比他在那时懂得的多得多的数学。爱因斯坦确实设法发现了两个重要的事实，这是他正在创立的理论的基本原理的产物。一个是红移，它发生于光线通过引力场的时候。比方说，由于恒星的引力场拉动光线，因而光线的能量减少。因为光的速度是不变的——狭义相对论的基本原则，因此，受恒星引力拉动影响的是光的频率和相关的波长。频率降低(单位时间光波的波峰减少)并且波长相应地增长。由于较长的波长落在红光的方向而不是蓝光的方向，这种波长的增长称为红移。在布拉格，爱因斯坦在理论上发现了引力红移现象。在他正在创立的这个理论中的第二个发现是光经过大质量物体附近时必定弯曲。由于像恒星之类的大质量物体使它周围的空间弯曲，也就是说，非欧几里得空间，因此，通过这样的大质量物体近旁的光线会弯曲并且符合空间的弯曲(虽然他推导出的弯曲量是属于牛顿理论的量，因此相差一半)。带着已得到的这两个发现和物理学其他领域中的研究成果，爱因斯坦准备回到瑞士。

布拉格大学的教授都配有一套制服。虽然平常不要求穿制服，但是在就职前宣誓效忠时以及被奥匈帝国皇帝接见时必须穿上制服。爱因斯坦一生厌恶权势、不拘礼节。制服使他很不舒服，但他会开

玩笑说，如果他穿了它到街上去，那么别人会当他是巴西的海军上将，使气氛轻松一下。在大学里，他的继任者菲利普·弗兰克到达时，他将制服作为礼物送给了弗兰克。而接任的弗兰克也只穿过一次制服——那是他宣誓效忠于奥匈帝国皇帝的时候。1917 年，弗兰克的妻子让他将爱因斯坦的制服送给一个前军官，他是俄国革命的难民，由于没有钱买外衣而正要冻僵在布拉格街头。

当爱因斯坦继续研究引力问题并试图在狭义相对论的框架内阐述它时，他得到一个惊人的结论：空间不是欧几里得式的。他在布拉格的逗留快结束时——也就是他决定接受苏黎世理工学院提供的正教授职位并回到瑞士之前，爱因斯坦写了一篇第二年发表在《物理学年刊》(*Annalen der Physik*)上的论文。他的论文叙述了他通过对空间和引力的研究得到的一个革命性的结论：欧几里得几何学的法则在一个均匀旋转的系统中不成立。根据狭义相对论，将会出现周长缩短、空间被扭曲的现象。这样，直线不再存在，而圆周长与直径之比也不再是 π。因为，根据他在伯尔尼导出的等效原理，一个均匀旋转的系统诱导一个与引力场等价的场，于是爱因斯坦得到一个极漂亮的结论：在大质量物体的近旁，空间不是欧几里得式的。但是，“欧几里得式”与“非欧几里得式”究竟意味着什么呢?

第四章　欧几里得的谜语

“没有坦途通向几何学。”

——亚历山大的欧几里得致埃及国王

托勒密一世，公元前306年

崎岖的俄勒冈州海岸上耸立着海拔高达1000英尺的珀佩图亚岬角，太平洋高高的拍岸巨浪以极精确的规律凶猛地撞击着它下方的多岩的小港。高耸于深蓝色的洋面上空，珀佩图亚岬角真是独一无二的。站在岬角顶端的人能清楚地看到地球是圆的，可以看到观察者面前的巨大的海洋在目所能及的各个方向上渐渐地向下弯曲。当小船驶离时，在观察者看来，它似乎沿着地球的球形表面长时间地向下滑动，慢慢地消失在这个巨大的蓝色球体的背后。

假如古代的巴比伦人、埃及人或希腊人生活在俄勒冈州的海岸上，或许数学和精确科学的历史会大大不同。但是，这些古人们没有居住在太平洋沿岸，也从未看到过我们生存的空间的弯曲部分。

巴比伦人和与他们的亲属亚述人居住在巴比伦的底格里斯河和幼发拉底河之间的平原上，他们的世界是平坦的。他们遗留下来的上万件陶器详尽地描绘了公元前4000年时他们的社会生活的各个方面，从这些陶器我们知道巴比伦人是精确计算土地面积的能手。他们知道如何利用直角去划分他们占有的平坦的耕地，从而可以使用简单的边与边相乘的方法算出小块土地的面积。他们也知道如何通过将圆内接的长方形的面积除以2来计算直角三角形的面积。巴比伦人和亚述人是平面几何学方面的专家。埃及人用于标明、划分和计算小块土地面积的几何学知识也是非常先进的。但是他们也居住在平原上，从未察觉到有必要去了解非平坦的曲面。甚至他们的金字塔也是直线几何的杰作——不过，是三维的。

公元前6世纪，毕达哥拉斯(Pythagoras)及其追随者们在意大利南部克罗托内他们建立的小村庄中，创立了基于古埃及人和巴比伦人的实用性工作的抽象定理。因此，毕达哥拉斯定理是巴比伦人对物质世界的数学解释的延拓。这个定理说：一块边长为一个直角三角形的斜边的正方形土地在面积上等于另外两条直角边上的正方形的面积之和。毕达哥拉斯定理在几何学中有重要的含意，因为它可以用来定义欧几里得空间中两点之间的最短距离。在这样的空间中，直线实现两点间的最短距离。如果我们知道两点在X方向上的差并且也知道两点在Y方向上的差，那么平面上这两点间的最短距离等于X和Y方向上差的平方和的平方根。然而，毕达哥拉斯更深入地研究，发现了无理数。他们注意到当直角三角形的每条直角边长等于1时，斜边长是一个奇怪的数——2的平方根，它是*无理的*：它不能写成两个整数之比。这个他们无法理解并且似乎在真实世界中不具有任何意义的新的数的发现引导毕达哥拉斯的信徒们走向将在我们这个

时代大大发展的数学领域。

数学继续在发展，在毕达哥拉斯之后两个世纪，亚历山大的欧几里得写了《几何原本》(*Elements*)—— 一本有 13 卷的书，被认为是前所未有的最伟大的教科书。《几何原本》的各卷展示了完整的几何理论——在迄今为止的 2300 多年中指导着数学研究的一种理论。欧几里得几何学是对物质空间的概念抽象化的一次尝试，其目标在于使用公理、公设和定理揭示空间的主要性质，这个空间被古代人认为是惟一的一种空间。

欧几里得定义他的几何学的元素是点、线和面——现在任何一个听过初等几何课的人都熟悉的概念。然后欧几里得设置了 5 个主要的公设：1.两点之间可连接一条直线；2.直线可以无限延长；3.已知圆心和半径可以画圆；4.所有的直角彼此相等；5.如果一条与两条直线都相交的直线使同一侧的内角和小于两个直角，那么，如果无限延长这两条直线，它们将相交于内角和小于两直角(180°)的一侧。

欧几里得第一卷中的命题或定理论述了直线的性质和平行四边形、三角形和正方形的面积。在这些命题的证明中，欧几里得实质性地使用了他的前四个公设，而第五个公设却哪儿也没使用过。如果去掉第五公设或者用另一个和其余四个公设相容的公设替代它，这些命题将仍然成立。这一点很早就是明显的事。虽然《几何原本》成了非常流行的书，一本影响西方思想达两千年的书，但是神秘的第五公设的微妙性质始终不断地在数学家的心中引起疑问。甚至在叙述中，第五公设也有点奇特：其余四个简洁清楚而第五公设则很长。对许多人来说，第五公设似乎更像是一个要证明的定理而不是一个自明的事实。

第五公设有几个等价的命题。称为平行公理的一个命题说：过一给定点只能作一条平行线与给定直线平行。另一个等价于第五公

设的命题是三角形的三个内角之和总等于两个直角(即 180°)。 正是第五公设后面的这个结果最容易进行分析。

从《几何原本》一问世，几何学家们就对第五公设作为整个理论的必需的部分或甚至是否正确表示怀疑。 第一个对欧几里得表示极度的不满的是一位我们从他那儿了解到许多有关这部著作的历史的几何学家。 他是公元 5 世纪的哲学家、数学家和历史学家普罗克洛斯(Proclus，公元 410—485)。 从普罗克洛斯那里，我们知道欧几里得生活于埃及的第一位罗马君主托勒密一世的统治时期，我们还知道国王自己写过一本关于欧几里得的有问题的第五公设的书——包括依据其余四个公设给出的对第五公设的一个证明。 这是我们从历史资料中所知的对证明第五公设是欧几里得的前四个公设的结果所作的第一次尝试。

普罗克洛斯在他的关于欧几里得的著作的历史中正确地论证了托勒密的那个关于第五公设是其余公设的结果的“证明”使用了“过不在直线上的一点只能有一条直线平行于该给定直线”这个假定——一个与第五公设等价的命题! 接着他试图给出对第五公设的多余他自己的“证明”。 他的证明同样是错的。

在伟大的古希腊文明过去之后，在欧洲从几个世纪的黑暗中觉醒之前，阿拉伯的科学在中世纪处于活跃的时期。 欧玛尔 · 海亚姆(Omar Khayyam，约 1050—1122)，他在西方因他的诗而出名，也是一位他那个时代杰出的数学家，写过一本书名为《代数学》的书。 这个时期的数学研究由前几个世纪中的另一些重要的阿拉伯和波斯学者继续进行着，他们是花拉子密(Al-Khowarizmi，公元 9 世纪)和比鲁尼(Al-Biruni，973—1048)，后者发展了大量的代数理论。 当欧玛尔 · 海亚姆在 1122 年去世时，阿拉伯的科学处于衰退状态。 然而，在马拉盖(在现在的伊朗境内)，下一个世纪生活着一位天赋非凡的数学家：

纳西尔·埃丁·阿尔-图西(Nasir Eddin Al-Tusi, 1201—1274)，另一种称呼为奈绥尔丁(Nasiraddin)。纳西尔·埃丁是旭烈兀汗的天文学家，旭烈兀汗是传奇中的征服者成吉思汗的孙子和忽必烈的兄弟。纳西尔·埃丁编辑了一本阿拉伯文版的欧几里得的著作和一本关于欧几里得公设的论文集。与前面两位阿拉伯数学家以及在他之前的古代数学家们一样，他也被欧几里得的第五公设所烦恼。

纳西尔·埃丁是第一个认识到与欧几里得第五公设等价的公设——三角形的内角之和必定等于180°（“两个直角”)的重要性的学者。纳西尔·埃丁与他的前人一样试图证明烦人的欧几里得第五公设是前面四个公设的一个必然结果。正如他的前人一样，纳西尔·埃丁也失败了。

欧几里得的经典著作在阿拉伯世界被广泛地研究，这导致在该著作的理性研究中关于平行公设的讨论，但是欧洲却并不知道这回事。12世纪初，一位英国旅行家，巴斯的阿德拉德(Adelhard，约1075—1160)从小亚细亚旅行到埃及和北非，在路上学习了阿拉伯语，然后他乔装打扮成一个穆斯林学生越过直布罗陀海峡进入摩尔人的西班牙。阿德拉德在1120年左右到达科尔多瓦，得到一本阿拉伯文版的《几何原本》。他秘密地将欧几里得的书翻译成拉丁文并穿越比利牛斯山脉将它偷偷地带进基督教的欧洲。正是这样欧几里得才最终到达西方。这本书被复制，在学者和知识分子中间流传；他们此时才学会希腊早在1500年前就知道的几何学的基本知识。当可以采用印刷术时，第一本被排印的数学书就是《几何原本》。当欧几里得的著作于1482年在威尼斯出版时，它是由阿德拉德偷带进来的阿拉伯文版本的拉丁文译本。直到1505年也是在威尼斯才由赞贝蒂(Zamberti)出版另一种版本的《几何原本》，它是由公元4世纪亚历山大的狄奥

恩(Theon)编辑的希腊文版的译本。

自纳西尔·埃丁研究第五公设以来已经过去了 500 多年，但是在这几个世纪中西方的数学几乎没有什么进步。中世纪不是数学和科学文化发展的好时期，纠缠于不断的争斗之中并遭瘟疫连续猛袭的欧洲不是追求知识和艺术的地方。到了 1733 年，一本用拉丁文写成的小书在米兰出版了。它的标题是《除去欧几里得的瑕疵》(*Euclides ab omni naevo vindicatus*)。作者是一位名叫吉罗拉莫·萨凯里(Girolamo Saccheri, 1667—1733)的耶稣会牧师。这本书是在它的作者去世那年出版的，但这还不是对社会仅有的不幸；这本开辟新天地的书，这本可能已经永远改变人们对几何学的理解的书还湮没了一百多年。只是在三位改变了几何学及它的内涵的数学家发表了他们各自独立的发现之后的 1889 年才偶然地发现了这本书。这三位数学家是高斯(Gauss)、鲍耶(Bolyai)和罗巴切夫斯基(Lobachevsky)。

吉罗拉莫·萨凯里在意大利的耶稣学院中教授语法和研究哲学的时候阅读了欧几里得的《几何原本》。萨凯里非常喜欢欧几里得在证明中使用的称为*反证法*的逻辑方法。这种当今在数学中广泛使用的思想是先假定与所要证明的命题相反的命题，然后按照逻辑步骤一步接一步地进行下去，直到得到所期望的矛盾为止。这种矛盾被认为证明了原来的假定是错的——因此，也就证明了它的反面即开始时要证明的命题是对的*。萨凯里知道纳西尔·埃丁 500 年前的工作以

---

* 矛盾法证明的一个简单的代数例子是对 2 的平方根是一个无理数，即 2 的平方根不可能写成两个整数之比的证明。一开始，假定其反面，即假定有两个整数 a 和 b，它们之比等于 2 的平方根。于是 $a^2=2b^2$。不失一般性，假定这两个数是最小的项(即它们没有可以约去的公因数)。如果 a 是奇数，我们立即得到矛盾，因为 $2b^2$ 是偶数。如果 a 是偶数，设它等于 $2c$，c 是某个数。于是，我们有 $a^2=(2c)^2=4c^2$，根据假定它必须等于 $2b^2$，这样 b 是偶数，因此 a 和 b 有公因数，这又与我们的假定矛盾。

及他为从欧几里得的另外四个公设去推导出欧几里得第五公设所作的努力。将反证法与自古以来证明第五公设的企图联系起来，萨凯里找到了一个奇妙的想法。他决定使用他喜爱的方法尝试一种证明。为此，他必须假定欧几里得第五公设不是另外四个公设的结果，而是实际上错的。在那时，萨凯里已经非常熟悉欧几里得第五公设以及历史上种种证明它的尝试，因为他本人在那时已经证明纳西尔·埃丁的证明是错的，以及牛津的约翰·沃利斯(John Wallis，1616—1703)* 在1663年的尝试也同样是错的。

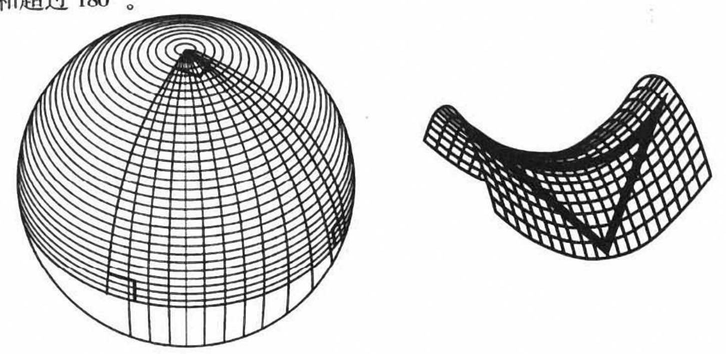
萨凯里假定第五公设是错的并希望得到矛盾。但是，他没有得到矛盾。萨凯里得到了希奇古怪的结果：过给定点可以有多于一条的直线平行于给定的直线。于是，关于三角形的三个内角的和，萨凯里最终得到了三种可能的结论，表达成第五公设的等价形式。这三种与欧几里得前四个公设没有矛盾的结论是，人们可以得到三角形的三个内角之和等于两个直角的系统(欧几里得)；三角形的三个内角之和小于两个直角(即小于180°)的系统；以及三个内角之和大于两个直角(即大于180°)的系统。今天，我们认识到后面这两种系统是不同的非欧几里得几何，每一个内部是无矛盾的，在数学上是成立的。它们描绘了在别的世界中看到的东西。萨凯里得到了这些新系统中的许多重要结果。但是他并没有意识到他已经发现了它们，他没有完成反证法只是因为这些系统并不是错的——事实上，它们在数学上是正确的！不幸的是到数学家们认可这些事实时，萨凯里已经去世许多年了。

从欧几里得在纸上写下它的那天起就使一代又一代的数学家们困

---

* 约翰·沃利斯，英国数学家，伦敦皇家学会创始人之一，对代数、几何学的发展和微积分起源有重要贡献，著有《无穷小算术》、《泛数学》等。——译者

惑并遭受挫折的第五公设，在其内部浓缩着世界是完全平直的这个观点。在这样的世界中，直线存在并且可以延伸至无穷远，不管它们延伸得多远，它们始终保持完全的笔直，丝毫也不弯曲*。想象一张非常平坦的曲面。在这里，通过一给定点有一条直线平行于画在该点下方的给定直线。这两条平行线延伸至无穷远却永不相交。它们永远保持着平行。在这张平坦的曲面上，每个三角形有着加起来等于 180° 的三个内角。现在将你的平坦的曲面想象为一片平坦的橡皮，在橡皮下面放着一个大球，大球向上方推进着。于是当球向上升起时橡皮片向球弯曲，直到曲面变成一个像大气球那样的东西。那么，彼此平行地延伸着的直线有什么变化? 它们弯曲了，并且它们在球的球形表面上现在看起来像是将要相交的样子。在球面上，不存在不相交的直线。而这里，三角形的三个内角加起来大于 180°。想一下地球上的一个三角形，它的一个顶点在北极，另外两个顶点在赤道上。现在考虑两条经线。经线与赤道所成的角是直角，即90°。所以在地球上的这个三角形中，两个角已经等于180°。这两条经线在它们相交于北极处形成的角就使这个三角形的内角之和超过 180°。

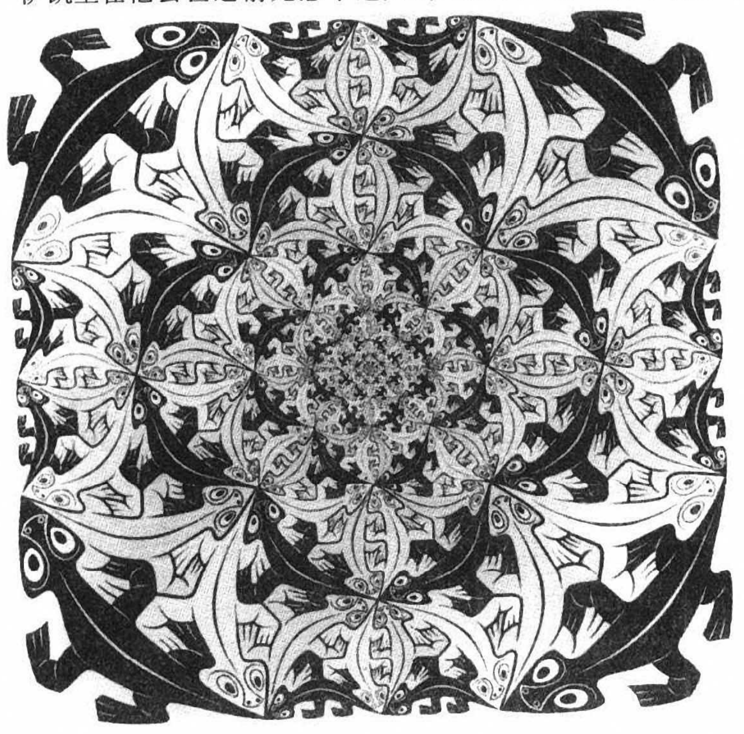


---

* 直线的无限延伸隐含于欧几里得的第二公设之中。在 19 世纪后期，伟大的德国数学家G·F·B·黎曼(G. F. B. Riemann，1826—1866)提出不同意见说：欧几里得的直线也可以被解释为无界的但不一定是无限的。球面上一个大圆可以被解释为一条无界却有限的直线。

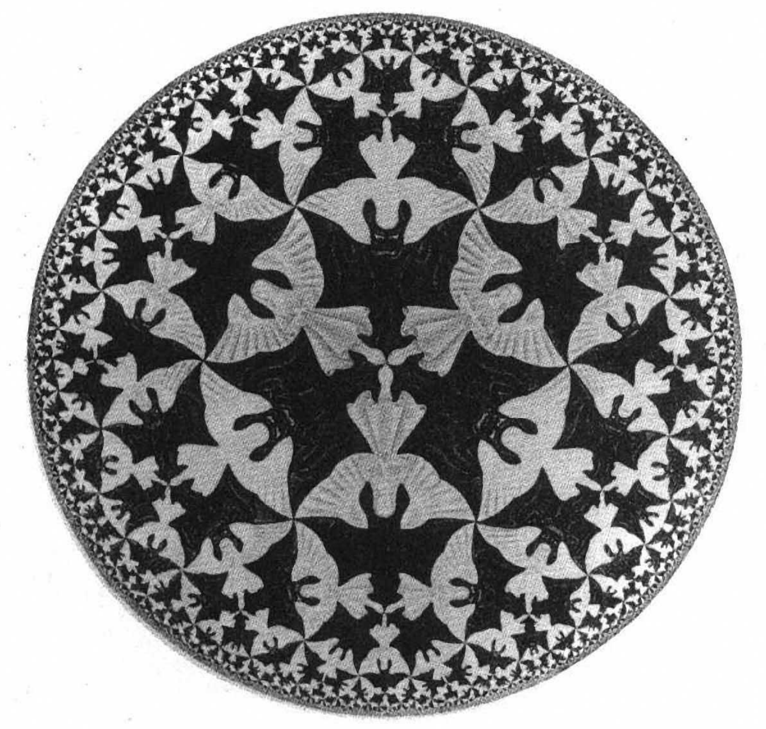
沿着萨凯里所预期的另一个方向也形成一种非欧几里得几何。刚才，我们最初的平坦曲面通过一个在它下面向上推进的球使它像球面样地变形。如果欧几里得曾站立在珀佩图亚岬角上看到世界是球形的并且让这个观点深入他的意识之中(因为他可能知道世界是球形的，但并没有意识到这个事实的重要性)，那么几何学的发展可能会十分的不同。但是通过将它在中间向下贴着一个马鞍的轮廓面延伸，平坦的曲面同样也可以作双曲型地变形，而不是球面型地变形。在这个世界中，通过不在给定直线上的任何一点可以有无限多条可能的“直线”平行于该给定直线。这里的三角形比较单薄：它们的三个内角之和小于 180°。

萨凯里在他去世之前无意中进入的正是这个奇怪的宇宙。但



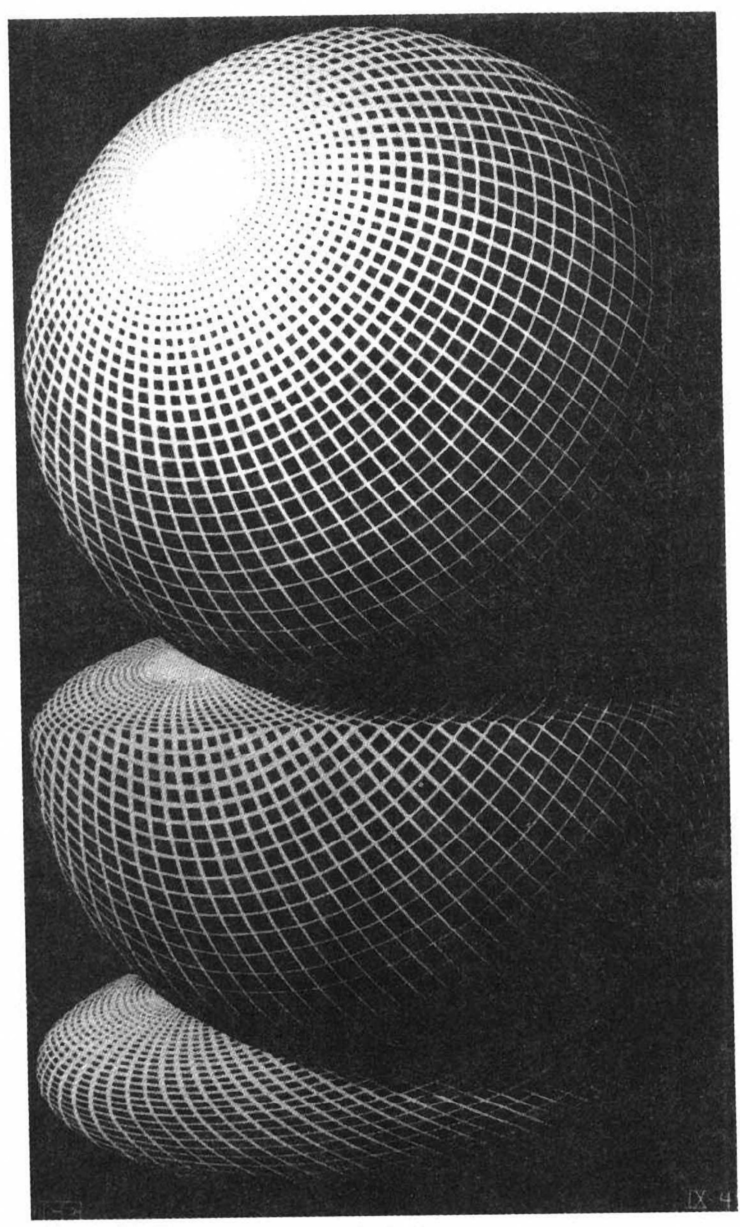
越来越小

是，在这两种球面的和双曲面的情形之中，重要之点在于平坦曲面已经被变形。想象一张平坦的大理石桌子，其上放置着一些直的金属杆，它们的边缘互相接触构成一些三角形。有人在桌下生了一堆火，火的热量使桌上的杆变形，因而三角形也改变了：杆由于热而弯曲——三角形的内角加起来不再是 180°。恰恰就是这个例子被阿尔贝特 · 爱因斯坦在 2 个世纪后用来描述非欧几里得几何如何在真实世界中实现。



天堂和地狱

19 世纪初，卡尔 · 弗里德里希 · 高斯(1777—1855)是数学界的领袖人物，一位对科学作出了惊人贡献的著名的德国天才。高斯花了几十年的时间反复思考欧几里得第五公设的问题。但是，高斯关于这个耗去他这么多时间和精力的谜没有发表什么东西——他写到过如



三个球面 I

此多重要的数学问题，但是，他对于几何学的想法，我们所知道的，绝大部分却来自于他的信件。高斯清楚地懂得驳倒第五公设就会走向非欧几里得几何学。

在著名的格丁根大学学习时，高斯曾和从出生地匈牙利到格丁根的沃尔夫冈(或法尔卡斯)·鲍耶［Wolfgang(或 Farkas)Bolyai，1775—1856］以朋友相待。高斯和鲍耶都花了许多时间尝试证明欧几里得第五公设。1804 年，鲍耶认为他有了一个证明并将它写成一篇短手稿。他将这手稿寄给他大学里的老朋友高斯，然而很快发现证明中有个错误。鲍耶并不气馁，继续他的努力。几年以后，他寄给高斯另一个尝试性证明。这个证明也是错的。尽管他是教授、剧作家、诗人、音乐家和发明家，沃尔夫冈·鲍耶终生没中断过他的数学研究，虽然他证明这个不可能的公设的尝试失败了。1802 年 12 月 15 日，沃尔夫冈的儿子约翰(亚诺什)·鲍耶［Johann(Janos)Bolyai，1802—1860］*出生了。沃尔夫冈写了一封热情洋溢的信给高斯，告诉他儿子的诞生："一个健康、气质很好的漂亮孩子，黑头发、黑眉毛和一双明亮的深蓝色的眼睛，这双眼睛不时地像两颗宝石一样闪耀。"

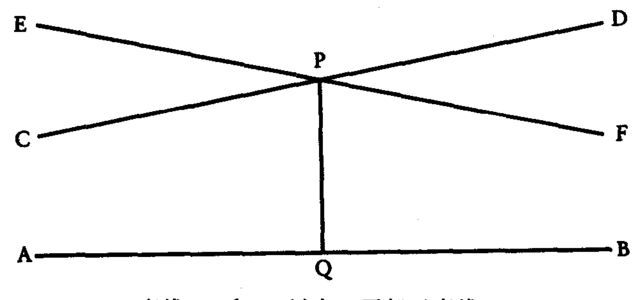
约翰长大成人并由他的父亲教他数学。他被父亲对欧几里得第五公设的专注以及想证明它可从欧几里得其余公设中导出的愿望所感染。1817 年，年轻的 J·鲍耶进了在维也纳的皇家工程学院，在那里，他花了很多时间去追求他父亲心爱的证明第五公设这个目标。当时，他的父亲写信给他，不顾一切地试图劝阻儿子不要再浪费时间于一个不可能的问题，这个问题已经消耗了他自己如此多的精力。

---

* 约翰·鲍耶，匈牙利数学家、非欧几何的创立人之一。13 岁时，在其父沃尔夫冈·鲍耶教导下掌握了微积分和分析力学。——译者

儿子没有动摇，他在追求他的目标上是坚定不移的，这个目标就是合理地完成他父亲失败了的几十年的艰难尝试。1820年，约翰·鲍耶得到了一个惊人的结论：与欧几里得几何的其余部分不同，第五公设非但不是可证明的，而且是通向一座使人心醉的花园——如他称呼的那样，新的空间的绝对科学的入口，欧几里得几何学只不过是其中的一种特殊情形。

鲍耶从欧几里得第五公设的平行公理版本出发：平行公理版，即过不在给定直线上的一点只能作一条直线平行于该直线。鲍耶接着假定这个公设是不正确的。他断言这将意味着或者没有直线平行于该直线，或者有多于一条的这样的直线。但是根据欧几里得其他的假定，直线是无限的。可以证明这个性质将与第一种可能性矛盾。于是只剩下第二种可能性作为欧几里得第五公设可行的替换。如果通过不在给定直线上的一点有两条直线平行于该给定直线，那么就有无限多条这样的直线。下图展示了这种情形。



直线CD和EF过点P平行于直线AB

随这个隐含关系而来的许多结果使年轻的鲍耶大为迷惑。他的新几何学的发展既无矛盾又无障碍，好像上帝本人也愿意空间几何学遵循这条令人惊异的新的非欧几里得途径进行。他怀着特别的激情注意到有许多性质无须借助关于平行线的任何假定就可导出，因而这些性质是所有可能的几何学——欧几里得几何和非欧几里得几何所共

有的性质。这些性质包含了空间性质的本质。鲍耶在 1823 年时只有 21 岁，他写信给他的父亲说："无中生有，我已经创造了一个奇异的新宇宙。"

J·鲍耶的父亲提供了帮助，最后，他将他儿子的开创性工作收进他自己的一本数学书中作为附录，简化的标题为《绝对空间的科学》(*Tentamen*)，并于 1832 年出版。

高斯在看到这两个鲍耶的书后评论说，他本人经过 35 年的对第五公设问题的深思也已经得到类似的结论。但是，还有另一位数学家也已经得到类似的结论。尼古拉·伊万诺维奇·罗巴切夫斯基 (Nikolai Ivanovich Lobachevsky，1793—1856)于 1813 年在位于离莫斯科朝向乌拉尔山脉的东面 400 英里的喀山大学取得了学位。他后来成为这所大学的教授并在 1827 年担任校长。由于他的工作——罗巴切夫斯基几何学也像鲍耶独自完成的那样放弃平行公设从而革新了几何学，他以"几何学的哥白尼"而闻名。19 世纪早期，当时鲍耶、罗巴切夫斯基和高斯的工作正崭露头角，有些数学家将这种新的非欧几里得几何学称为"星际几何学"——星星的几何学，尽管还不清楚他们怎么会想到这样一个名称。*

在鲍耶—罗巴切夫斯基—高斯的几何学中，三角形的三个角之和不等于 180°。在这种几何中的一个圆不再是日常生活中(欧几里得的)普通的圆：这里，圆周长与直径之比不等于那个自然的数 π。

*　*　*　*

* 1818 年，卡尔·施韦卡特(Karl Schweikart)使用这个名称向他的朋友格尔林(Gerling)描述非欧几里得几何，格尔林是高斯的学生，时任马堡大学的天文学教授。

爱因斯坦继续沿着从他生命中“最快乐的想法”开始的推理思路前进。他仍在瑞士专利局中从事着他的著名的思维实验之一。爱因斯坦想象一个在空间中自旋着的一个圆盘。圆盘的中心不运动，但是，它的周界快速地按圆形方向运动着。爱因斯坦比较了在几个参照系中所发生的现象，参照系是他在创立狭义相对论中使用的标准工具。他利用狭义相对论得到结论：当圆盘自旋时，圆盘的边界缩短。有一种在边界上作用于圆盘的力——离心力，它的作用类似于引力的作用，但是，这种影响外侧圆周的收缩却保持直径不变。因此，爱因斯坦断言圆周长与直径之比不再是 π，这甚至使他也震惊。他推出在存在引力(或场)的情形下，空间的几何是非欧几里得的。

第五章　格罗斯曼的笔记本

“他，与教师们关系很好，什么事都知道；而我，一个贱民，不被重视，也没人喜欢。”

——爱因斯坦给马塞尔·格罗斯曼遗孀的信*

爱因斯坦虽然是一个任性的不安分的学生，但是，为了他的革命性理论他需要坚实的数学基础。他获得的大部分数学知识是从一位品行良好的学生马塞尔·格罗斯曼的笔记本中得到的。马塞尔·格罗斯曼(1878—1936)出生于布达佩斯一个有着很多代瑞士血统的家庭中。当他15岁时，格罗斯曼回到瑞士完成高中的学业，从1896年到1900年在苏黎世理工学院学习。格罗斯曼在苏黎世的大学中学习数学，专修几何学，并获得了这个领域中的博士学位。后来他写过关于非欧几里得几何学的论文和教科书。

与爱因斯坦不同的是，他的这位处于世纪交替之际的苏黎世理工学院的同学格罗斯曼是非常认真的，从不缺课并且非常仔细地记笔

记——教师心目中的理想学生。格罗斯曼在苏黎世理工学院听过闵可夫斯基以及别的数学家和物理学家的课程。他的笔记本——现在保存和展示在苏黎世理工学院的档案馆中——对于爱因斯坦完成广义相对论所非常需要的数学起了关键性的重要作用。爱因斯坦关键的方程是以这些以及别的更高级的数学为依据的。但是爱因斯坦要感激他的朋友格罗斯曼的还远不只是数学。格罗斯曼的父亲帮助爱因斯坦获得伯尔尼专利局的职位，当时这个年轻的毕业生正找不到工作。1905年，也就是爱因斯坦发表关于狭义相对论和关于方程 $E=mc^2$ 的第一篇论文的年份，他也向苏黎世理工学院呈交了他的博士学位论文。这篇学位论文，即“论分子维数的新决定方法”，是他献给他的朋友马塞尔·格罗斯曼的。

正是格罗斯曼在1911年末在布拉格找到爱因斯坦，询问他是否有兴趣回瑞士接受他曾就读过的苏黎世理工学院的职位。当时已经有欧洲的许多别的大学邀请爱因斯坦任职，但他非常激动地接受了苏黎世理工学院的邀请，返回瑞士国土。虽然在那年以前，他为了能够接受在布拉格的职位必须取得奥匈帝国的国籍，但是他保留着他的瑞士国籍。1912年初，爱因斯坦回到了他心爱的瑞士。

在断定空间是非欧几里得的之后，爱因斯坦需要帮助。他向他的老朋友寻求帮助，他的老朋友此时已经是爱因斯坦恰好需要了解的领域中公认的专家。一些爱因斯坦传记的作者和关于相对论的书籍的作者声称爱因斯坦不擅长数学。这种说法离事实太远。这位为世界贡献相对论的科学家是位出色的数学家，问题只不过是早年当他在苏黎世理工学院当学生时不怎么注重坐在讲堂里听数学课。他懂得

---

* R. W. Clark, *Einstein: The Life and Times*, New York: Avon, 1972, p.62.

足够的用于创立狭义相对论的数学，并且只要是他自己需要的数学他就有能力去学会。爱因斯坦和数学家赫尔曼·闵可夫斯基的关系可算是一个恰当的例子。爱因斯坦在苏黎世理工学院时并没有认真地对待闵可夫斯基的课程。几年后，当狭义相对论被科学界承认时，闵可夫斯基写了爱因斯坦相对论中的数学，他的四维空间常被称为闵可夫斯基空间。

不像爱因斯坦，格罗斯曼是一位认真学习数学的学生。他的笔记本在爱因斯坦的广义相对论的创立中占有特殊的地位。既然已回到苏黎世理工学院，爱因斯坦意识到他需要帮助——非常急需的帮助。如果空间是非欧几里得的，那么他必须很清楚地了解它的几何学，否则他无法利用他关于引力和相对性的思想进一步做任何事，而关于空间实际的各种几何学，爱因斯坦几乎什么也不知道。

格罗斯曼翻出上世纪末的泛黄的听课笔记，寻求关于爱因斯坦在他的宇宙和引力场模型中应该从哪儿着手的启示。这些笔记以及格罗斯曼后来关于几何学的工作告诉格罗斯曼他的好朋友所需要的专门方法是19世纪后期两位意大利数学家：格雷戈里奥·里奇和他的天才学生图利奥·列维-齐维塔所创立的方法。令人啼笑皆非的是，早在布拉格时，数学家乔治·皮克就曾告诉爱因斯坦这两个学者的工作能帮助他发展继续深化他的理论所需要的数学。但是，很明显，爱因斯坦当时没有听进去。而现在格罗斯曼是他在几何学世界中的领路人，他十分听得进。

非欧几里得几何学本身并不能给爱因斯坦的问题以答案。这类几何学使用直线、角、平行线和圆等等描述空间。爱因斯坦则需要更多，他需要的绝大部分是不变量。好的物理定律是恒定不变的：

当参照系或者测度单位改变时，它们不会改变。以每小时60英里的速度开车跑120英里要花2小时，如果我们用公里来表示距离并用公里/小时表示速度，这个答案也不会改变。爱因斯坦正在寻求一种数学工具能使他超越空间的弯曲——它的非欧几里得性质——从而使得这个理论中的变量在任何类型的弯曲空间中都有效。格罗斯曼慷慨地提供了自己的笔记和参考书，但是，这不足以解决爱因斯坦的引力难题。

在1912年的几个月中努力研究这个问题以后，爱因斯坦向他的老朋友发出恳求："格罗斯曼，你必须帮助我，要不我就要疯了!"格罗斯曼注意到了这个恳求并且开始十分认真地与爱因斯坦合作。结果两个人写了许多关于引力问题的论文。这些论文是朝向广义相对论的又一步，但是，他们仍缺少为彻底了解他们打算描述的复杂现象所需要的东西。

正是在那时，爱因斯坦将注意力转向张量这个概念。这个概念对于表达为解决相对性问题，首先是狭义相对论，然后是更为复杂的广义相对论所需要的越来越复杂的数学很有帮助。简单系统可以用关于单个数表示的变量的方程描述。例如，一条直线是由方程 $y = ax + b$ 给出的。这里 x 和 y 是单个的数，a 和 b 是系数，它们也是单个的数。在斜率 $a = 2$ 以及截距 $b = 3$ 的直线上，可以解出当 $x = 5$ 时 y 的值：$y = 2(5) + 3 = 13$。当问题变得更为复杂时，就可能需要几个方程，或者一个其变量是用一组数表示的方程，这里 x 可能是一个向量，即一组有序的数，y 以及别的变量也同样如此。在物理学中，速度、加速度和力都是向量，因为它们都既有大小又有方向，因此，它们中的每一个都被描述为一组数。

但是，爱因斯坦现在需要的东西是向量的推广，其复杂程度又上

一个层次。他需要的是张量——一种变量，是向量概念的推广。三维空间中的一个向量有3个分量。三维空间中的一个(二阶)张量则有$3^2=9$个分量。张量保持爱因斯坦所需要的不变性原理，它在复杂情形中解释变量的由来。广义相对性事实上提出了非常复杂的问题——爱因斯坦必须考虑10个量，用$g_{\mu\nu}$表示，它们解释四维空间(3个为空间维数，1个为时间维数)的弯曲。这个解释弯曲的奇特东西$g_{\mu\nu}$是一个张量，称为*度量张量*，因为它测度弯曲空间中的距离。但是，为了得到有意义的结果而需要的数学并不是现成的，还需要别的某种数学——比里奇和列维-齐维塔更一般的某种数学。爱因斯坦必须有一种方法来处理度量张量使得不变性原理在他的方程的任何变换下仍然成立——他需要一种超越于空间的弯曲的方法，不管这种弯曲是以何种形式出现的。他和格罗斯曼的工作只能使他在线性变换下保持不变性，这种情形对于他必须实现的目标来说限制太强。只是在1913年的夏天，爱因斯坦才充分认识到他和格罗斯曼的工作的不足之处。

爱因斯坦非常喜欢他在苏黎世的新生活。他生活在一个熟悉并喜爱的地方，他与全家生活在一起。他的妻子米列娃和他们的两个儿子非常依恋瑞士，这给他带来一种幸福感。爱因斯坦也和朋友们在一起。正是在这里他开始和学生及同事们一起讨论宇宙的问题。爱因斯坦创立的引力方程隐含着关于整个宇宙的某些结果，他正热心地尝试揭示这些隐含的关于我们生活着的宇宙的结果。

朋友们和同事们常常这样描述离开大学讲堂后无忧无虑的爱因斯坦：被一群学生围着，面前是他喜爱的咖啡，盛在刻有“Zürichberg”字样的杯子中的泰拉斯咖啡。他们会在那里呆上几个小时，讨论着这些理论对于我们生活着的浩瀚太空的范围、形状、过去和将来等哲

学上的含意。

但是在1913年的春天，爱因斯坦接待了一次来访，这次来访将改变他的生活，又再次使他举家迁离，搬到另一个国家中去。这是马克斯·普朗克(1858—1947)和赫尔曼·能斯脱(Hermann Nernst, 1864—1941)* 对苏黎世的访问。马克斯·普朗克是当时最伟人的物理学家——他是量子论发展史上的一位杰出人物。据爱因斯坦后来自认，普朗克是他惟一真正崇敬的科学家。我们知道喜爱和尊敬会交替而生。普朗克和物理学家赫尔曼·能斯脱在柏林曾为获准邀请爱因斯坦到柏林大学任教积极游说。

普朗克和能斯脱到过苏黎世并在爱因斯坦家里与他会晤。在那个时候，爱因斯坦还收到别的邀请，其中之一是荷兰的莱顿大学的教授职位。他们俩竭力说服爱因斯坦接受柏林的职位，但是爱因斯坦不想马上作出决定。在他作出决定的期间，普朗克和能斯脱继续在瑞士的阿尔卑斯山区登山旅行。爱因斯坦答应在他们回来时给他们一个决定。他说："将有一个信号，这样你们一看见我时就会知道我的决定。"当他们的火车驶进苏黎世火车站时，他们看到爱因斯坦站在月台上，手中握着一束红玫瑰。

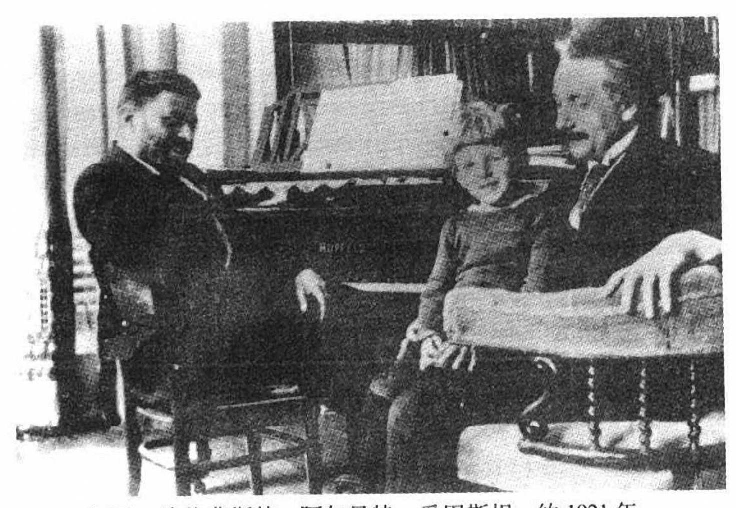
爱因斯坦从他喜爱的苏黎世移居到正在兴起反犹主义的柏林，这曾经是众说纷纭的一个话题。似乎爱因斯坦有几个理由作出这样一个出人意料的决定。首先，柏林是一个远比苏黎世重要的科学中心。像普朗克这样的伟人就住在那里。其次，爱因斯坦的职位不需要教书。这是一个重要的因素，因为爱因斯坦经常抱怨教书工作

---

* 赫尔曼·能斯脱，德国科学家，现代物理化学的奠基人之一，因提出热力学第三定律而获1920年诺贝尔化学奖。——译者

占去他太多的做研究的时间和精力。第三个理由则是爱因斯坦想离一个大天文台近一些，这样他可以与天文学家们交流。远非以前那样，他现在强烈地希望对他的广义相对论中涉及的光线弯曲原理有一个天文学的证明。在柏林，至少有一位他经常与之通信的天文学家——埃尔温·芬莱·弗罗因德利希。

爱因斯坦并没有立即察觉到他和格罗斯曼建立的方程有问题。1913年初，他写信给他的朋友保罗·埃伦费斯特(Paul Ehrenfest, 1880—1933)，在信中他总结了他的成果："引力的事已经阐明到我完全满意的程度。可以明确地证明不可能存在由度量张量完全决定场的广义共变方程。"但是两年后，爱因斯坦意识到他的错误，并且事实上创立了广义共变方程——他的引力场方程。这发生在柏林，当时正处于第一次世界大战的高潮。不过，爱因斯坦在苏黎世遗留了一本难懂的小笔记本，小笔记本中包含有他对方程的推导和对所期望的引力场方程的尝试。80年后，研究者们发现了这个小笔记本并引出了关于爱因斯坦的工作的意外发现。



保罗·埃伦费斯特、阿尔贝特·爱因斯坦，约1921年。

爱因斯坦和格罗斯曼在爱因斯坦离开苏黎世时分手。在以后的岁月中，格罗斯曼忙于处理社会和政治事务。他深深地卷入到对成为战俘的各国学生的慈善援助工作之中。1920年，他开始显露出患有多种硬皮症的迹象，最终因此症而于1936年逝世。在爱因斯坦的广义相对论被世人承认之后很多年的1931年，格罗斯曼写了一篇激烈的文章攻击这个理论的某些方面，这明显的是在听了爱因斯坦对这些话题所作的演讲之后产生的愤怒。爱因斯坦似乎宽恕了这种对他们的友谊和合作研究的背叛，1955年，他以充满情意感人至深的笔调记述了格罗斯曼以及他们的合作。他还写道，后来他发现，他和格罗斯曼曾与之奋斗过许多个月的，在研究中出现的数学方面的困难，在几乎一个世纪之前就已经被德国数学家伯恩哈德·黎曼所解决。

第六章　远征克里米亚

“我很高兴我们的同事们正忙于我的理论——即使其目的是希望消灭它。”

——阿尔贝特·爱因斯坦，给埃尔温·芬莱·弗罗因德利希的信，1914 年 8 月 17 日

克里米亚，1914 年 8 月 1 日

由于德国对俄国宣战，俄国在黑海边逮捕了一名德国科学家并将其转解到敖德萨。埃尔温·芬莱·弗罗因德利希被怀疑是德国间谍。他当时正带着看上去有点古怪的装备——望远镜——在旅行。他的装备被没收，而他则被拘押至 8 月底，那时他和他的小组与德国拘押的俄国高级军官做了交换。在他整个被囚禁期间，弗罗因德利希坚称他是一名科学家，此行是为了观测日食。回到柏林后，弗罗因德利希拜访了爱因斯坦。为什么弗罗因德利希要冒生命危险到一个正与他自己的国家交战的国家去旅行？他想在那里干什么？他与爱

因斯坦这样一个曾放弃德国国籍，只是后来又重新取得德国国籍并迁居柏林的德国科学家到底是什么关系?

* * * *

在柏林见到波拉克后不久，埃尔温·芬莱·弗罗因德利希开始了他与爱因斯坦的合作，爱因斯坦当时仍在布拉格。他俩于 1912 年 4 月在柏林相见，当时爱因斯坦研究出了引力透镜问题*。一年以后，在他的蜜月中，弗罗因德利希和他的新娘在访问苏黎世时与爱因斯坦见面。当这对新婚夫妇乘坐的火车于 1913 年 9 月初到达苏黎世车站时，他们看到弗里茨·哈伯在月台上等候他们。哈伯当时是凯泽·威廉研究所所长，和他在一起的，穿着邋遢的运动服、戴着一顶草帽的是阿尔贝特·爱因斯坦。

爱因斯坦邀请弗罗因德利希和他的新娘陪伴他到弗劳恩费尔德，他将在那里发表关于相对性的演说。从那里出发，他们旅行到康斯坦茨湖沿岸，后来又返回苏黎世，爱因斯坦与弗罗因德利希在整个期间认真地讨论着有关这个理论的问题以及验证结果的方法。11 月 8

---

* 实际上，爱因斯坦与弗罗因德利希第一次见面的确切地点和时间仍是一个谜。罗纳德·克拉克(Ronald Clark)根据与弗罗因德利希夫人的谈话，在他写的传记中提出了对弗罗因德利希—爱因斯坦关系的一些说法，断言这两人第一次见面是在苏黎世，时间为 1913 年(《爱因斯坦：他的生平与时代》，纽约，埃文出版社，1984 年，第 207 页)。然而，在给米凯莱·贝索的一封于 1912 年 3 月 26 日从布拉格发出的信中(文献 337，《阿尔贝特·爱因斯坦论文集》，M·J·克莱因及其他人编辑，普林斯顿大学出版社，1983 年，第 5 卷)，爱因斯坦告诉他的朋友，他马上要去柏林见普朗克、能斯脱、哈伯和“一位天文学家”。这个天文学家非常可能就是弗罗因德利希，因为他是在这段时间中仅有的与爱因斯坦有交往的天文学家。爱因斯坦那本记载着他那年在柏林逗留时的约会安排的笔记本已经被柏林的马克斯·普朗克科学史研究所的于尔根·雷恩和他的同事们找到并做了研究。尽管笔记本中记载有重要的天文学想法以及与不同人见面的时间和姓名，但是没有提到过弗罗因德利希。然而，最使人信服的证据是 1935 年利奥·波拉克给爱因斯坦的信(耶路撒冷的爱因斯坦档案馆文献 11—180)，在信中他说，他在 1911 年为这两人做了介绍。

日，爱因斯坦收到加利福尼亚州利克(Lick)天文台的坎贝尔(Campbell)教授的一封信，爱因斯坦曾写信给坎贝尔索取在一次日食期间天文台拍摄的太阳附近的恒星的照片。他将这些照片送给弗罗因德利希去分析。这次分析并无成果。

有关爱因斯坦与弗罗因德利希的关系的资料，绝大部分来自于收集到的残留下来的爱因斯坦在1911年到1931年的20年间写给这个年轻的天文学家的25封信件。* 这些信件讲述了一个迷人的故事，它的全部细节直到现在尚未透露。这是一个讲述命运变化莫测的故事。这是一个关于世界上最伟大的理论物理学家如何渴求实验肯定他的假设以及希望通过一位热心的年轻的天文学家来实现它的故事。这是一个关于战争的邪恶、政治的丑陋以及这两者是如何阻挡了人类的求知的故事。它也是一个关于幸运、忠诚、信任和人际关系之反复无常的故事。

当从波拉克那儿得到这个年轻的天文学家有兴趣于他的工作的信息后，爱因斯坦马上给弗罗因德利希写了信。他的信在措辞上，尤其是在称呼上非常客气，几乎有点儿讨好。在他的第一封信中以及后面的许多封信中，爱因斯坦——即使还不算是10年以后成为世界级的人物，在那时也已经是著名的物理学家——称这个新得道的天文学家为“非常尊敬的同事先生”。接着他十分大度地对弗罗因德利希对这样的一个重要问题(广义相对性)抱有高尚的志趣表示了他的谢意。他鼓励他尽一切努力寻找对这个理论预言的观测证据，说天文学家能够通过发现这样的证据而对科学作出巨大的贡献。在爱因斯坦的语气中暗示着他的渴望，在读他的信时可以清楚地感觉到他会尽

---

* 这套集子保存在纽约的皮尔庞特·摩根图书馆。

全力设法通过物理方法来证明他的理论事实上是正确的。

在大质量物体周围的空间是弯曲的，光线通过这样的物体附近时会弯曲。此外，光的频率向光谱红端的移动(引力红移)表明越过引力场的光线将损失能量——就像一个人攀登曲曲弯弯的楼梯时会感到疲劳一样。爱因斯坦将注意力集中于他确信在自然界中存在的光线弯曲现象。他问这位年轻的天文学家是否有一种探测这种现象的方法。

9月份，爱因斯坦轻描淡写地表露了似乎尚属首次的对弗罗因德利希为他所作的努力的失望。他写道："要是大自然能给我们一颗比木星大的恒星有多好啊！——但是大自然没有给我们这种可能性去找到它。"在寻找理论上的光线弯曲现象的证据时，似乎弗罗因德利希选择了观测途经木星旁到达地球的光线。他没有发现这种效应。经过约一个世纪，在事后看来，我们容易明白，为什么弗罗因德利希会失败。弯曲效应是相当小的，而木星——虽然比地球大得多——但质量只有太阳质量的千分之一那么大。木星的质量不足以让人测量出光线在它附近的弯曲。

9月21日，爱因斯坦有了新的想法。他意识到在其附近有机会探测到光线弯曲的最小的大质量物体大概必定是太阳。他问他的非常尊敬的同事先生有多大可能在白昼寻找到星光。很清楚这是必要的，因为星光从太空的遥远处发出，如果能在白昼从某个角度使得当它通过太阳附近时能看到它的话，那么，如果知道这颗恒星预期的位置就有可能探测到弯曲。可以将光线预期的位置与它们观测到的因通过太阳附近而受到影响的位置做比较，这样就可以证明弯曲现象的存在。爱因斯坦想要知道天文学家是否有一种方法在白昼看到恒星，并在太空中找到一颗出现在太阳附近的恒星。

在1913年早期，爱因斯坦写信给弗罗因德利希，再一次感谢他的使人非常感兴趣的信以及他寻找这个理论的证据的巨大热忱。信中他还写到有关他继续研究广义相对性概念使人愉快的细节，并在信中不时夹杂一些显然目的在于唤起他年轻同事对此计划的激情的问题。爱因斯坦的信表露出他发狂似地寻求一个完美理论的情怀。他用强硬的语句写出他对一些和他竞争的理论的感觉，这些理论是亚伯拉罕(Abraham)、米(Mie)和努德斯特伦(Nordström)的理论。贡纳尔·努德斯特伦(1881—1923)是一位芬兰物理学家，他就爱因斯坦的场方程作出了一些有独创性的工作。爱因斯坦和格罗斯曼的方程由于参数的相关性而遇到了麻烦。努德斯特伦的想法是设法创立一种替代广义相对性的理论，其中的光速 c 与爱因斯坦的方程中引入的场无关。在这封给弗罗因德利希的信中，以及在以后的通信中，爱因斯坦表现出他对所寻求的理论的狂热。爱因斯坦这样描写努德斯特伦的工作：这是一种使人着迷的理论，但是它正确的可能性很小。爱因斯坦写道：如果努德斯特伦的理论是正确的，那么将存在引力产生的红移，但是不存在光线的弯曲。于是，爱因斯坦竭尽全力去找一种探测光线是否在引力场中发生弯曲的方法：这样的一种测试将证明爱因斯坦——或努德斯特伦——是对的。在爱因斯坦的语句中对他自己的竞争力没有丝毫的怀疑。他相信，只有他和他的(尚未完成的)理论才是正确的。

正是在这封写于1913年初某天的信中，爱因斯坦第一次提到日食。早些时候，1912年，爱因斯坦似乎认为，在白昼当星光经过太阳附近时能够观测到它。在1912年末与1913年初之间的某个时候，他和弗罗因德利希显然得出了不存在这种可能性的结论。在某个时候他们之中的一位必定已经想到日全食现象将提供一个完美的实验场

合。在日全食期间，事实上这发生在白昼并且太阳也已升起，然而由于月亮的阴影产生的黑暗使得恒星仍然是可观测的。所以，尽管大自然没有给我们一颗足够大的木星，但是它给了我们这个奇妙的现象，这种现象粗算起来每隔二三年就会出现在地球的某处，并且使我们得以在正午时分既看到太阳又看到星星。

一当意识到这一点，爱因斯坦感到无比兴奋。在一封信中，他告诉弗罗因德利希他在一本美国杂志上看到在日食时将几个光学系统一起使用可以观测到太阳周围的星星。他还说在他这个“门外汉”的脑子想来这似乎是合理的。但是在接着的通信中，当涉及天文学时，爱因斯坦却完全不是门外汉。明显的是，伟大的理论家已经得到结论：未经物理验证的理论是没有什么大价值的。在相当短的时期中，他似乎已自学了大量的天文学知识。在许多信中，他谈到了有关日食观测仪器的真实设计过程的非常技术性的问题和有关用于拍摄太阳近旁的恒星照片所必需的摄影底片的准备细节。

1913 年 8 月 2 日，爱因斯坦重申他的信念：“理论上我们得到一个结果——我十分坚信光线将弯曲。我特别对你在白昼观测星星的计划感兴趣。”然后，他继续长篇论述悬浮在大气层中的小粒子以及它们可能的可见性效果，可能拍摄到的照片的质量以及别的天文学方面的技术事项。接着他对弗罗因德利希解释道：“当运转光学系统时，你必须使整个太阳在照片中，还要带有部分我们感兴趣的天空——这一切应在一张底片上。但是曾有人推荐两个光学系统一起使用。还不清楚的是如何一起使用两张照片。我非常想听听你对这个方法以及任何别的方法的想法。”似乎爱因斯坦决心将每件事安排得井井有条，他甚至连天文学家们日常工作中的琐碎活也不打算留给他们去安排。

这位理论家并没有只研究光线弯曲的问题。在同一封信中，他继续说，他对弗罗因德利希关于双星的研究非常好奇。弗罗因德利希的想法是观测彼此环绕运行的双星系统，然后，如果以某种方法能够估计这一对恒星的质量以及他们彼此绕行的径向速度，那么当光从一颗星经过另一颗星时就有可能探测到爱因斯坦广义相对性预言的引力红移。不幸的是，这被证明是实验的一条死胡同。无论是弗罗因德利希，还是其他人的研究都没有得到任何结果。这现象最终是在20世纪60年代哈佛大学完成的一次实验中探测到的。但是在追寻这个特定的目标时，弗罗因德利希后来犯了严重的计算错误，这最终激怒了爱因斯坦。这封信在结尾时写道：如果这样的实验会以某种方式导致在测量光的速度上(不是像红移表明的在频率上)的差异，那么“包括引力理论在内的整个相对论将是错的”。在结尾处，爱因斯坦说道，当弗罗因德利希和他的新娘在他们的蜜月里来到苏黎世时，他终于见到弗罗因德利希时有多么高兴。

1913年10月22日，爱因斯坦从苏黎世寄出下一封信之前，他们已经在瑞士见过面，并对探测假定存在的来自遥远恒星的光线在经过太阳附近时弯曲的问题进行了广泛的讨论。在这封信中，爱因斯坦在敷衍性的“同事先生”之后写道：“我从心底里非常感谢你的大量的消息以及你对我们的问题显示的浓厚兴趣。”显然，弗罗因德利希曾试图得到别的观察日食的天文学家过去拍摄的照片，并且尝试辨别出太阳阴影附近的星体图像。但是，他的所有这些尝试都失败了。不难理解为什么会出现这种情况的道理。在日全食期间太阳本身完全被遮掩的同时，太阳的日冕却不这样。被遮住的太阳发出的明亮的火舌，在遮住太阳的月亮的圆形黑影周围向外延伸出很远的距离。因而很难辨别出日冕区域中的星体，并且探测它们的移动也需要专门

为此目的设计的实验。不幸的是，此前没有任何人曾经做过这种实验，因为没有人觉得有必要去探测太阳附近的星星发生的移动。

这封信的其余部分很清楚地表明，观察日食是爱因斯坦的想法而不是弗罗因德利希的想法。事实上，弗罗因德利希的天生粗心——这被后来他在计算双星的质量估计中所犯的低级错误所证明——在这个早期过程中已经表现出来。在他的信中，爱因斯坦花了相当的篇幅反驳弗罗因德利希肤浅的观点：太阳附近星光移动的探测可以在不是日食的白昼完成。爱因斯坦耐心地解释说，他已经请教过当地的天文学家们，这样的努力是否可能成功，而得到的回答是毫不含糊的“不”。*

到了1913年12月7日，爱因斯坦和弗罗因德利希为证实太阳附近光线弯曲的实验地点达成一致意见：将进行一次到克里米亚观测预报在1914年8月发生的日全食的远征。他们现在深入讨论了远征的细节，而剩下的问题是如何为它筹划经费。当从弗罗因德利希那儿听到一切都已安排好之后——包括一个完整的如何旅行到俄罗斯，再从那里到克里米亚的计划，如何使用他设计的望远镜设备，如何在日食期间拍摄太阳及其周围太空的照片，以及如何将这些照片与在夜间拍摄的太空同一区域太阳附近的星星处于它们通常位置时的照片做比较——爱因斯坦立即与普朗克联系，他请普朗克帮忙取得经费，资助他尝试证明他认为已经创立的这部分广义相对性理论。

然而，似乎这个计划并没有引起普鲁士科学院足够的兴趣为它提供资助。在12月7日给弗罗因德利希的信中，爱因斯坦说普朗克对这个问题是感兴趣的，但是，如果科学院不分给经费，那么他，爱因

* 这种技术在今天仍办不到。即使在日食期间，探测光线弯曲也需要复杂的程序。

斯坦，将动用他自己微薄的积蓄来冒险。显然，爱因斯坦对未能得到资助非常愤慨，他在信中句子“我不会写信给斯特鲁韦”底下划了线。赫尔曼·斯特鲁韦是波茨坦的皇家天文台台长。爱因斯坦曾希望从天文台获得这个计划的资助，但是显然他已经被断然拒绝。于是，他继续说：“如果什么都不行的话，我将从我自己的很少的积蓄中至少首付2000马克，因此，请订购必要的底片，不要因钱的问题而浪费时间。”

然而那时突然开始发生了一些事情，没有什么能制止这些既是科学上的又是历史性的事件的进程。1914年4月6日，爱因斯坦和他全家从苏黎世搬到柏林。在哈伯的帮助下，他找到了一处公寓，但是不久，米列娃和阿尔贝特·爱因斯坦分手了，她将孩子们带在身边回到了瑞士。然后爱因斯坦搬到一个单身汉的寓所，似乎他已经调整过来适应了这些变化，虽然这是十分痛苦的事，因为他非常爱恋他的两个儿子。他与他在柏林的亲戚们又重新来往熟悉，并发现其中的一位堂妹埃尔莎·爱因斯坦(Elsa Einstein)特别令他愉快，于是他开始与她建立了密切的友谊。不出5年，在与米列娃离婚之后，这两人结婚了。

1914年7月2日，爱因斯坦当选为普鲁士科学院院士。当年他34岁，是最年轻的院士。所有其他的院士都是老资格的科学家并且年龄大得多。从他在接到通知他将马上被授予这个荣誉之前在苏黎世与同事们的谈话中，我们知道爱因斯坦并不怎么在乎这个荣誉称号。虽然如此，他仍然向院士们发表了愉快的讲话，他为这荣誉，为在科学院中当个自主的院士使他能每日每时进行他的研究工作而感谢他们。作为一个科学院院士，他无须为教书或别的义务去操心而可以将全部时间花在研究上。从他与同事们的通信中我们知道爱因

斯坦喜欢生活在柏林，也喜欢他的职位为他提供的新的重要身份。他现在准备以重新焕发的活力去为实验计划谋求资助。

尽管爱因斯坦在苏黎世时未能取得资助，弗罗因德利希却取得了部分的成功：天文台长斯特鲁韦已经(勉强地)同意让弗罗因德利希参加日食计划，但是没有配给任何观测经费。而在柏林，科学院院士爱因斯坦在继续努力解决钱的问题。最后，科学院资助该计划2000马克——爱因斯坦原来准备从他自己的积蓄中提供的钱——并且指定这笔经费用于更换为观测日食所需的科学仪器以及购买必需的摄影底片。到克里米亚的旅费及设备的运费还需要3000马克。在这个观测日食的故事中，有诸多曲折的遭遇，其中的一个就是，这笔钱来源于一个在事后看来像是不可能的地方。

古斯塔夫·克虏伯(Gustav Krupp，1870—1950)是德国企业界的一个巨头，他的军火制造业要对当时的许多大屠杀负间接的责任，包括土耳其人对亚美尼亚人的大屠杀，土耳其人使用了克虏伯的武器。1918年，克虏伯设计了一种专门的远程火炮用于从74英里远处炮轰巴黎市平民，大概杀死了256个人。* 正是克虏伯的钱使得希特勒能发起反对凡尔赛条约，并且在1933年给了希特勒必需的选票赢得德国议会中的多数席位。这家企业在第二次世界大战中向纳粹供应武器，是纳粹恐怖的一个必不可少的工具。1914年，古斯塔夫·克虏伯提供了3000马克支持这次寻找爱因斯坦的广义相对论的证据的远征。

当远征时间接近时，爱因斯坦变得越来越兴奋、焦虑和离群。

---

* Martin Gilbert，*A History of the Twentieth Century*，Vol. I，New York：Morrow，1997，p.490.

他的传记作者罗纳德·克拉克讲述了在所计划的日食观测成行之前的那段紧张的日子里，爱因斯坦对弗罗因德利希家频繁地拜访。由于他不断地和远征的领头人弗罗因德利希保持见面，爱因斯坦显然将一切都安排确定。他常常在拜访弗罗因德利希家时带着他的工作。在那里，不等饭吃完，他就会把盘子推开，开始在主人昂贵的桌布的顶端处书写方程。许多年后，弗罗因德利希的遗孀告诉克拉克说，她后悔没有按她丈夫所建议的那样保存这块桌布，因为它可能会值很多钱。*

似乎随着时间的推移，爱因斯坦的心中交织着两种感情。首先，他对即将到来的日食观测的结果十分担心。他现在是一位有些声望的科学家：他的狭义相对论已得到科学界合情合理的充分的承认——尽管还有反对者。而仍在初建阶段的广义相对论正受到其他科学家的注意，遭遇着极有力的竞争和不少人的怀疑。他在科学院中的同事都比他年长并且在经历和见识方面都属于重要人物，在他们中间，爱因斯坦现在是并且将继续是一个局外人。他甚至必须强迫自己在这段时间里一改他那种天生的不修边幅的外表，穿上与他的新的高尚身份相配的令人肃然起敬的服装。爱因斯坦极想得到肯定的结果，证明他的关于空间、时间和引力的希奇古怪的理论是正确的。而在同时，爱因斯坦却对他理论的正确性越来越有信心。在给他的好朋友米凯莱·安杰洛·贝索的一封信中，爱因斯坦写道："不论日食观测成功还是失败，我都不会怀疑整个理论的正确性，它的合理性太明显了。"出乎意料的是爱因斯坦错了。一切如命运安排的那样，弗罗因德利希前往克里米亚找到的是那大小只有自然界中真实发

---

* Ronald W. Clark, *Einstein: The Life and Times*, New York: Avon, 1984, p.222.

生的一半那么多的光的偏折。不过，当弗罗因德利希准备出发时，爱因斯坦已经做了决定，如果这次关键性实验的结果是否定的，那么错的是实验——不是他的理论。这是一个最有力的例子，它表明在某些情形下，对于一个理论家来说，所设想的描述自然界的方程会因其本身的价值而具有生命力，并且被看成如此的完美和神圣以致现实也只能退居次位。

1914年7月19日，埃尔温·弗罗因德利希与两个同事离开柏林，其中之一是著名的德国照相镜头制造商卡尔·蔡司(Carl Zeiss)的一位技术人员。经过一个星期的旅程，他们到达克里米亚的费奥多西亚镇并安装他们观察日食的仪器。弗罗因德利希为了尽可能保证至少拍出一张能清晰地显示出日食期间太阳附近的星星的好照片，他携带了4个不同的照相机和望远镜。德国小组遇到了另一个来自阿根廷的小组，他们为了别的目的也到那里拍摄日食照片。有趣的是，阿根廷小组试图拍摄到祝融星——一颗被假想存在于太阳附近的小行星，这种假想起因于几十年来在水星轨道中探测到的小的有规则的光行差。人们相信祝融星以及它在太阳附近的轨道是水星的近日点问题的原因。由于命运的又一次异乎寻常的转折，最终解决光行差问题的正是德国小组去测试的爱因斯坦的广义相对论。水星轨道的偏移并非另一颗行星所引起，没有东西存在。它是由太阳的引力场对离它如此近的这颗行星的作用引起的。在短短的几年后，弗罗因德利希本人编纂了一张长长的水星轨道的历年观测表，这张表再加上广义相对论解答了这个问题。现在这两个小组，一个来自阿根廷，而另一个来自德国，共同使用他们的资料和技术以及仪器，紧张地等待着8月21日太阳消失的那宝贵的2分钟。

但是在这段时期，历史正在经历另一个进程——远远偏离了科学

和知识的方向。在弗罗因德利希从柏林出发到克里米亚之前的3个星期，弗兰茨·斐迪南(Franz Ferdinand)大公，奥匈帝国皇位的继承人，正在访问已经被帝国兼并的波斯尼亚省省会萨拉热窝市。塞尔维亚外交部长就这次访问采取了警告大公的异常步骤，劝告他说，在省会中已经发生塞尔维亚人的骚动，因此，现在或许不是访问的好时机。弗兰茨·斐迪南未被吓住。6月28日，当大公的汽车正载着他去出席在市政大厅的典礼时，一枚炸弹猛掷在大公的汽车上。炸弹爆炸了，但是大公和他的妻子，霍恩贝格的女公爵没有受伤。然而针对奥匈帝国皇太子的阴谋浓雾重重——其他的阴谋者在他行程的更远处等着他。第二颗炸弹被掷向大公，不过没有爆炸。继续往前，汽车长队来到大公的汽车必须调头转向的一个地方。在这个瞬间，第三个杀手，一个19岁的名叫加弗里洛·普林西普(Gavrilo Princip)的学生掏出一把手枪向弗兰茨·斐迪南和他的妻子射击，打死了他们俩。这些杀手属于一个称为黑手社*的恐怖团体，他们实际上反对的是塞尔维亚政府。这个团体的目标是要南方的斯拉夫人脱离哈布斯堡王朝实现独立。谋杀使全世界震惊。引发第一次世界大战的乌云开始密布在欧洲上空。然而，似乎尽管哈布斯堡王朝及其盟国都对这次袭击表示愤怒，柏林的德国皇帝和弗罗因德利希克里米亚远征的组织者们却对潜藏的政治局势全然不以为意，从未认为与俄国的战争已迫在眉睫。在巨大的战争暴力即将爆发之际，弗罗因德利希和他的伙伴平静地为观测预定于8月21日在俄国控制的境内发生的日食做着准备工作。

当折叠在一个金烟匣中的关于弗兰茨·斐迪南大公被刺的照会被

---

* 黑手社，20世纪初期塞尔维亚的秘密组织。——译者

扔上他的游艇时，德皇正在参加在基尔港举行的赛船会。皇帝被激怒了并决定立刻回柏林。他的驻维也纳大使建议他对塞尔维亚人略示惩诫，但威廉二世不予宽容。他决定，塞尔维亚人必须被“干掉——并且要立即干掉”。德国的公众舆论支持他，7月4日，德国驻英国大使忠告霍尔丹(Haldane)勋爵说，他对局势的发展和明显的战争可能性非常担心。英国建议要克制并希望和平。战争无任何益处却会失去一切。但是德国和奥匈帝国不这么看。德皇由于其对俄国的恶感而特别好战。他相信必须阻挡住俄国，否则俄国将主宰欧洲并威胁到德国在欧洲大陆上的霸权。德皇对奥匈皇帝弗兰茨·约瑟夫(Franz Josef)试图为他儿子的死亡对塞尔维亚人复仇提供有力的支持——而对谋杀大公的调查结果报告置之不顾，这个报告没有发现塞尔维亚政府卷入此事。

1914年7月23日，奥匈帝国发表对塞尔维亚的最后通牒。这个通牒在各国历史上是绝无仅有的，因为这个最后通牒逐字逐句规定了奥匈帝国要求塞尔维亚在对内和对外方面所作的事项。从要求塞尔维亚政府在境内禁止一切反奥宣传到坚持在谋杀调查委员会中应包括奥地利官员在内，这个最后通牒列出了15项要求，如果塞尔维亚不能全部照办就意味着战争。塞尔维亚除了一个条件外全部同意，但是弗兰茨·约瑟夫不同意谈判而是动员他的军队并准备发起攻击。塞尔维亚指望俄国对他的塞尔维亚盟国给予有力的支持，而德国则准备帮助奥匈帝国。俄国沙皇希望防止战争，在7月27日提出一个建议让奥匈帝国与塞尔维亚彼此对话，通过谈判达成一个协议，但是奥地利政府立即拒绝了这个建议。随着欧洲各国或者加入俄国与塞尔维亚一方，或者加入奥匈帝国与德国一方，如果爆发武装冲突，那么很清楚，它将无法遏制并将演变成一场世界大战。

8月1日早晨，沙皇尼古拉二世再次向德皇呼吁继续保持两国长久的友谊和防止两国之间的流血事件，但是威廉不为所动。然而，他希望将冲突限制为只在东部的战争，而不去攻击法国和低地国家*。但是他的将军们已经在西线也做了部署。那一天的晚些时候，德国军队越过边境进入卢森堡并占领了附近的村庄。德皇试图限制战争，命令他的军队返回德国，但几小时后，他又改变了想法并派遣德军重进卢森堡向比利时挺进。同一天，8月1日的傍晚，英王乔治五世从伦敦发出一份极为激动的电报到柏林和圣彼得堡，为制止即将爆发的第一次世界大战做最后的努力。但是这些尝试都徒劳无功。当天深夜，德国驻俄国大使在圣彼得堡外交部面见俄国外交部长并交给他一份对俄国的宣战书。

当战争爆发时，弗罗因德利希率领的德国小组发觉自己已深陷在敌方领土内部。因为这些德国人携带着敏感的光学仪器，俄国人十分怀疑他们是间谍。1914年8月的第一天，弗罗因德利希小组被逮捕。小组成员被作为战俘关起来。8月4日，爱因斯坦忧病交加，写信给他的朋友保罗·埃伦费斯特："我亲爱的天文学家弗罗因德利希将成为俄国的战俘而不再能观测日食。我为他担心。"战俘们从克里米亚被带到敖德萨，在那里被关押了近一个月。幸运的是，德国刚好俘获了一群俄国高级军官。俄方急于交换战俘。普鲁士科学院与德国政府交涉并获准释放弗罗因德利希和他的同事交换俄国军官。到了9月2日，弗罗因德利希回到柏林。但是，爱因斯坦通过日食观测来证实他的理论的希望也破灭了。

弗罗因德利希在柏林度过了剩下的战争年头，尽管他还在业余时

---

* 即指西欧的荷兰、比利时和卢森堡三国。——译者

间为爱因斯坦工作，但是，他们两人之间的关系变得十分不愉快。爱因斯坦对此的观点在他 1921 年 9 月 10 日写给弗罗因德利希的信中可以看出，他说："我认为我们彼此再碰面没有什么用处。我很高兴(与 1914 年相比)我们彼此已了解更深。我们关系中的整个变化有时还得感谢那个英国人。"爱因斯坦明显地在责备弗罗因德利希，而后者曾在战火中为爱因斯坦的理论冒过失去生命和自由的危险。爱因斯坦的积怨似乎持续达 5 年之久，直到一个英国人在弗罗因德利希未被准许踏上的土地上取得成功。*

但是，如命中注定似的，到 1919 年，爱因斯坦完成了广义相对论，并且纠正了他的关于光线因太阳的引力而偏折的真实量度的误差。这种纠正是在 1915 年 11 月 18 日做的，当时爱因斯坦宣布预料中的刚好擦过太阳边缘的光线发生的偏折量应为 1.75 弧秒，是他在 1914 年预言过的量值的两倍。于是出现了一个哲学上的问题：如果历史允许弗罗因德利希进行他的实验——探测到 1.75 弧秒(± 实验误差)而不是像爱因斯坦当时预言的 0.87 弧秒(实际上，爱因斯坦犯了一个额外的算术错误得到的值为 0.83 弧秒)的光偏折，那么会发生什么事呢？广义相对论会被判为正确的，还是错误的呢？

应该指出：当光被视为粒子并进而对它应用过去的牛顿理论时，对应的光线偏折量是较小的 0.87 弧秒(如果计算时没有数学错误)。正是由于正确地吸纳了相对性才使得这个值变成两倍。因此十分可能，假如弗罗因德利希的实验成功的话，科学界还不会认为广义相对

---

* 这封信清楚地证明，当弗罗因德利希的日食探测失败时，爱因斯坦与弗罗因德利希的关系开始恶化。爱因斯坦—弗罗因德利希关系的其他研究者显然没有领悟到这一点。在最近的《杰出的爱因斯坦》（*The Einstein Tower*，斯坦福大学出版社，1997 年，第 137—138 页)一书中，克劳斯 · 亨切尔断言，这种关系在 1921 年开始恶化，当时弗罗因德利希企图用爱因斯坦的一份手稿获取钱财，这激怒了爱因斯坦。

论已经被证实。或许爱因斯坦还得耐心地等待得到证实才去完成他的理论，因而也不会去责备他的忠诚的天文学家。

爱因斯坦对弗罗因德利希的有点忘恩负义的态度在以后的岁月中有多方面的表现，人们只能对这位天文学家表示同情，他为爱因斯坦冒如此大的危险并且对这个在当时的科学界中曾引起如此多怀疑的理论信任无疑。

爱因斯坦对这位天文学家的鄙视的、有时莫名其妙的态度在他的信中日益明显。在1914年的失败的尝试之前，爱因斯坦在寄给他的信中一直使用的称呼“非常尊敬的同事先生”已经不见了，而是被代之以简单的“亲爱的弗罗因德利希”。在1917年的一封未署日期的信中，爱因斯坦写道：“昨天普朗克和斯特鲁韦谈起你，斯特鲁韦恶骂你。你干得不像他所期望的那样。普朗克认为你最好的解决办法是找一个教理论天文学的工作，并且他认为你很有机会找到。我认为他是对的，因为一个人不应该将所有的希望押在获得天文台的工作上。谨致问候。A·爱因斯坦。”

爱因斯坦与弗罗因德利希继续通信很多年，似乎他常常被请求帮助弗罗因德利希寻找工作或发表论文。从这些信的语调中很清楚，爱因斯坦已经认为自己是德国科学精英的重要成员了，常常将他的著名的朋友普朗克的名字挂在嘴上。弗罗因德利希似乎未能保住他的职位，在1919年的一封信中爱因斯坦写道：“我认为在大学当讲师是一个好位置，但是不容易谋得，不要为此事头发灰白，去享受你的假期吧！凡事总有尽头。只要你神经紧张就无法保护自己。我们共同的朋友们向你和你的妻子致意，A·爱因斯坦。”在另一封信中，爱因斯坦说他将建议科学院接受弗罗因德利希的工作，如果弗罗因德利希能回答爱因斯坦提出的6个技术问题。1919年3月1日，由于奇

怪的巧合，爱因斯坦写信给弗罗因德利希说，他刚看过一篇关于英国天文学家阿瑟·爱丁顿(Arthur Eddington)的工作的清晰有趣的介绍文章。爱因斯坦并不知道的是，爱丁顿当天正准备乘船登上到赤道非洲沿海的一个海岛观测日食的旅程，并且试图探测星光的偏折以证明爱因斯坦的广义相对论。

第七章　黎曼度量

"像黎曼这样的几何学家，可能差不多已经预见到了真实世界更为重要的特征。"

——阿瑟·S·爱丁顿

格奥尔格·弗里德里希·伯恩哈德·黎曼(Georg Friedrich Bernhard Riemann，1826—1866)出生于德国汉诺威附近的布雷泽伦茨的小村庄中一个(基督教新教)路德宗牧师的家中，在6个孩子中排行第二。黎曼在贫困的家境中长大成人，并且在他短促的一生中一直健康状况不佳。曾有人说过，如果黎曼健康稍佳并且活得稍微长一点的话，那么好几个数学分支的发展将会快得多。

黎曼在6岁时就显露出数学天才，当时他不仅能解答向他提出的任何算术问题，而且能对他的那些大感困惑的教师提出新的问题。10岁时，黎曼由一位专业教师给他上数学课，这个教师发现黎曼对问题的解法比他自己的还好。到了14岁，黎曼发明了一种万年历作为

礼物送给他的父母。

伯恩哈德·黎曼是一个十分腼腆的男孩，他为了克服这种胆怯，每当有公开说话的机会时他就加倍地做好准备。在青少年时期，他成了追求尽善尽美者，任何一件工作在没有做得最好之前决不拿出去让别人知道。这种尽量避免意外的癖好在他的科学生涯中起着重要的作用。

1846年，19岁的黎曼进入著名的格丁根大学学习神学。他的决定是为了取悦于他的父亲而作出的，后者想要儿子追随他的足迹成为牧师。但是，年轻的黎曼被当时在这所大学里任教的包括伟大的高斯在内的优秀数学家们的数学课程吸引住了。在他父亲勉强的同意下，黎曼改学数学。在格丁根大学学习一年后，黎曼转学到柏林大学。在那里他接受了良好的数学教育，他的思想受到一些著名的数学家雅可比(Jacobi)、斯坦纳(Steiner)、狄利克雷(Dirichlet)、艾森斯坦(Eisenstein)和其他人的熏陶。他在柏林大学度过了两年。接着在1848年出现了政治动乱，黎曼被征召进学生军团服役，曾经一连16个小时在皇宫保卫国王免受粗暴的示威者的侵袭。

1849年，黎曼回到格丁根大学攻读博士学位。他的博士研究导师是卡尔·弗里德里希·高斯。黎曼对几何学作出了重要的贡献，并继续从事数论的研究。黎曼以他发现的 ζ 函数而闻名，ζ 函数运用复分析理论深化了对质数的研究。寻找使得 ζ 函数等于零的复变量值已经成为数学中最引人注目的问题之一。1850年，经过对物理学以及数学中许多领域的问题思考以后，黎曼得出深刻的哲学信念，即必须建立完整的数学理论，这种理论将采用那些决定空间中点的基本法则并将它们改造成适用于极一般的“充满物质的空间”(黎曼意指连续填满的空间)。正是这种想法最终使他得以在数学上作出巨大

的广泛的突破，这些突破在一个世纪后帮助变革了整个物理科学的未来。

1851年初，黎曼向他的导师高斯提交了他的博士学位论文，标题为“复变函数的一般理论的基础”。这项工作质量非常高，对理论作出了实质性的贡献，以致高斯——他在此前和此后从未再这样做过——高度地赞扬了这项不是由他本人而是别人完成的工作。然而这还只不过是以后一系列工作的前奏，虽然短短的几年后高斯和黎曼都将去世。

1854年，黎曼在格丁根大学作为由学生们自己付钱的教师开始了他的教师职业(在德国大学这是做教师通常的第一步)。当时德国大学的惯例是要求每一个新教师向系里报告一篇尚未发表的论文作为任职的一种仪式(这种论文称为教师任职资格论文)。已经在复分析和其他领域中作出重要贡献的黎曼非常仔细地并以他通常的对工作追求完美的态度做了准备。高斯，这位年迈的大师，以及大学里每一位杰出的数学家都会到场听他演讲。

黎曼持续不停地并挑剔地工作起来。根据传统的做法，他必须提交考虑给他这个职位的系三个论题，按他喜欢的次序列出，供系里考虑指定作为报告的论文。他的头两个论题属于他的主要研究领域，黎曼自然希望这两个中的一个被选中。第三个论题是关于几何学的，这个论题他准备得并不是非常充分。历来系里会给候选人指定他或她的第一个论题，比较少的次数是指定第二个论题，但不会去指定第三个论题。因此，黎曼努力地完善他的前两个论题的准备工作。

但是高斯的想法却不同。我们还记得，高斯对于欧几里得第五公设和非欧几里得几何曾琢磨了几十年，而鲍耶和罗巴切夫斯基则开

创了那个领域。高斯在他对几何学的深思中发展了关于曲率的思想。他定义平坦的欧几里得空间的曲率为零，球面的曲率为正，而球面的双曲“对立物”的曲率为负。

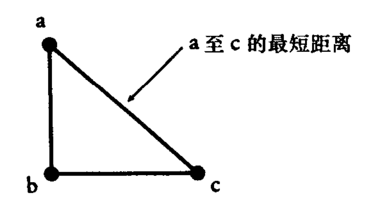
高斯了解年轻的黎曼的才华，认为或许他能够作出突破。他指定黎曼的第三个论题。

黎曼发展了一种全新的理论作为这次报告的内容，他早些时候就已经完成这种理论的雏形。在他致力于复数和数论领域的同时，黎曼还花了些多余时间研究他的关于空间的哲理，并曾独立地发展了高斯关于曲率的想法以及鲍耶和罗巴切夫斯基的思想。他隐隐约约地觉得在所有这些根本不同的关于空间及其几何学的概念背后存在着一种博大的贯穿全局的理论。是否可能将这种理论统一成一门极有成效的超脱于琐碎枝节之上的新学科？即使在他研究别的领域中的问题时，他的脑海深处总出现这个想法。直到做报告的日期快要来临之前，他还不知道是否有可能加以推广。报告的日子到了，年轻的数学教师的试用资格演讲是向年长的教授们做的。他展示的是一种将会永远改变几何学和物理科学面貌的理论。黎曼的奠基性的思想是什么呢？

黎曼是他那个世纪中最优秀的纯粹数学家之一。但是他远不止只是一个纯粹的数学家。在他的脑海深处燃烧着要了解他周围的物质世界的本质的欲望。远在相对论和现代宇宙学之前，黎曼就懂得为了掌握物质世界的内涵必须建立对空间的深入理解。而对他来说，空间就意味着几何学。因此，黎曼对描述物理学定律感到兴趣，因为它们和我们生存的空间的几何学有关。他一直是个兴趣广泛的人，不喜欢陷入细节和单调乏味的工作而爱好抽象和一般性。黎曼知道有三种几何学：欧几里得几何学、双曲几何学和椭圆或球面

几何学。但是，他也知道一个曲面的几何在其内部可能会变化：例如，它并非必须是球面几何或只是欧几里得几何。一个曲面的几何在不同的点处可能会变化。黎曼需要有力得多的某种东西。他需要一种不管它们的几何如何变化都能适用的描述曲面的方法。而正是在这一点上，黎曼得到了最终使阿尔贝特·爱因斯坦得以完成他的广义相对论的新发现。

黎曼认定对于曲面他需要了解和掌握的性质是*距离*(也称为*度量*)的概念。在平坦的欧几里得空间，两点之间的最短距离是直角三角形 abc 的斜边长 ac，这里如下图所示沿 x 方向的距离是 bc，沿 y 方向的距离是 ab。



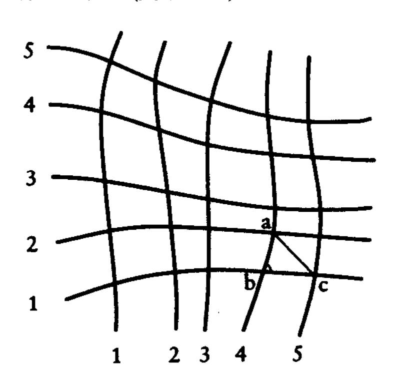
黎曼的创造性在于将这个距离推广到空间不再平坦的情形。例如，如果空间被弯曲，结果这个直角不再是直角而大小为 ϕ，那么前面的定理可以从毕达哥拉斯定理 $c^2 = a^2 + b^2$ 推广成：$c^2 = a^2 + b^2 - 2ab\cos\phi$。一般来说，不管空间的曲率多大，甚至这个曲率沿曲面上各点而变化，黎曼定义了测量曲面上两点之间的微小距离的函数。距离函数的平方是：

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx_{\mu} dx_{\nu}$$

这里 μ 和 ν 取遍整数 1，2。

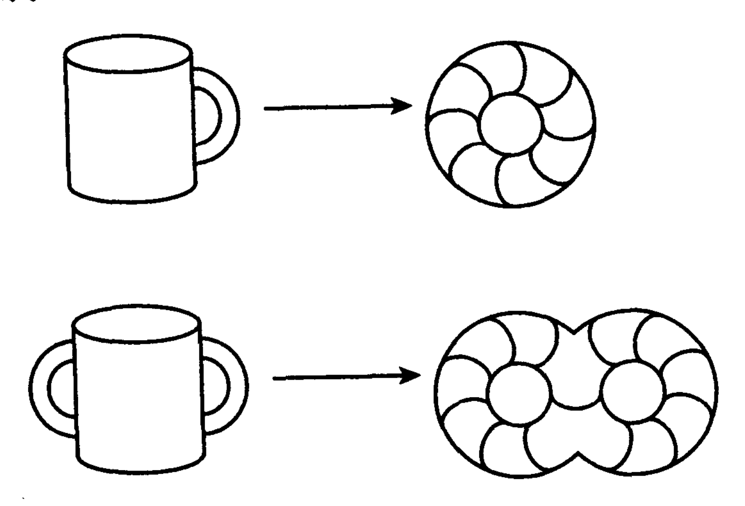
60 年后，阿尔贝特·爱因斯坦就是使用这个公式而指标 μ 和 ν 取遍整数 1，2，3 和 4，并且考虑了四维空间(3 个代表空间，1 个代表时间)，最终给出了广义相对论方程。项 $g_{\mu\nu}$ 是爱因斯坦的张量方程

中的关键元素，确定度量张量，它使爱因斯坦得以计算引力场加在宇宙空间上的曲率。当指标 μ 和 ν 在 1，2，3 和 4 范围内变化时，略去对称的项($dx_1 dx_2$ 与 $dx_2 dx_1$ 是相同的)，四维时平方后的距离的定义函数中出现的共有 10 个量(为什么?)。



在数学史上最著名的试用任职资格演讲中，黎曼提出的思想开辟了一个新的领域。只是现在才有可能不用考虑曲面上局部出现什么情形，而将注意力集中于大的图形——因为度量元素完全可以处理这件事。然而，在对曲面的局部处理中度量也是有用的。这导致一种全新的理论：微分几何，这是一个在 20 世纪取得重大进展的领域。这种一般的处理方法还涉及到拓扑学领域。黎曼自己在解决复变函数理论中的问题时研究过拓扑学的方法。拓扑学是研究空间和连续函数的学科。它处理诸如一个曲面是连接的还是由几个不连接的部分组成的；点列是收敛于空间本身中的一个点还是收敛于空间外的一个点，以及是否可能用有限个子集覆盖一个无限空间这样的问题。这些问题比几何学所提出的问题更为一般，但是，这两个领域之间有很强的联系。拓扑学也被人们认为是研究利用连续函数(或变形)导出的等价性的一门学科——从这个意义上讲，一个面包圈等价于有一个柄的茶杯，一个球面等价于任何一个封闭的二维曲面，而有两个洞

的面包圈就像一只有两个柄的茶杯一样。下图展示了这些等价关系。



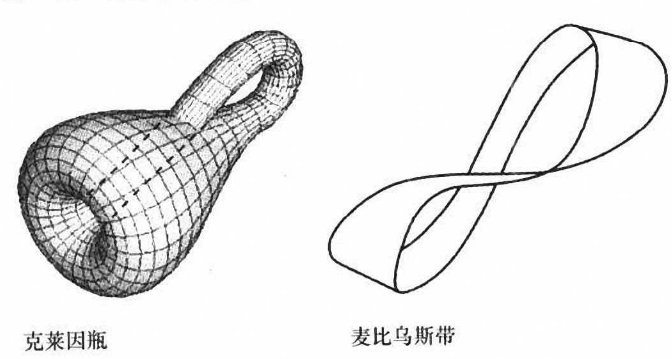
最要紧的是拓扑学阐述了有关曲面(或称为流形)的整体几何性质。而在这个方面，可以有非常大的一般性。通过研究拓扑学，数学家可以得到比几何学可能得到的更一般和更抽象的真理。两个著名的例子是麦比乌斯带——一个在第三维上扭曲而成的二维曲面——和克莱因瓶——一个通过第四维上扭曲而成的二维曲面。以A·F·麦比乌斯(A. F. Möbius，1790—1868)* 名字命名的麦比乌斯带只有一个侧面。这个曲面用于传动带中可以减少磨损(可以说两个“侧面”都在连续使用)。克莱因瓶是没有内部的瓶。它是以费利克斯·克莱因(Felix Klein，1849—1925)** 的名字命名的。克莱因是普吕克(Plücker)的学生，曾受黎曼在1854年的任职资格演讲中提出的思想的影响。克莱因对几何学极具热情并努力在拓扑学中渗入几何学的

---

* A·F·麦比乌斯，德国数学家和理论天文学家。以麦比乌斯带和对解析几何的研究而著名。——译者

** 费利克斯·克莱因，德国数学家。著有《二十面体讲演集》、《自守函数论讲演集》等。——译者

思想。在这方面，他使用了“群”(group)这个有力的代数学思想。借助于群论，克莱因对拓扑学做了黎曼对几何学所作的同样的工作：他完成了统一化和抽象化。



克莱因瓶　　麦比乌斯带

黎曼的工作，直接和间接地为了解物质世界贡献了所必需的关键的要素部分。他的任职资格演讲被高斯和他在格丁根的同事们赞美为伟大的杰作，提供了后来使爱因斯坦得以写下他的广义相对论场方程的直接的专门工具。黎曼在拓扑学方面的工作，以及他的工作对克莱因及其一个世纪后的追随者们的影响，使得英国数学家罗杰·彭罗塞爵士提出了一个迷人的定理。这个定理基于爱因斯坦的相对论，但是使用了有力的一般的拓扑方法证明了我们的宇宙是如何发端的。

黎曼在几何学方面的工作，导致现代微分几何学领域的确立，并最终导致当代最重要的几何学家陈省身在 1979 年于普林斯顿大学举行的爱因斯坦百年诞辰学术讨论会上所作的演讲中展示的许多成果。这个演讲的题目为“相对论和黎曼后的微分几何”，演讲强调说，广义相对论的未来发展在于更具数学普遍性的方向。陈省身证明了黎曼度量可以推广为更深入和更复杂的概念，这种概念只是在 20 世纪后期才被发展。很可能这些有力的

新工具——以及某些现在尚未充分发展的东西——会有一天告诉我们了解宇宙真谛的方法。它们甚至可能使我们实现爱因斯坦在有生之年尽管做了持久的尝试而未能完成的目标：一种将所有的物理力统一起来的理论，“包罗万象的理论”。

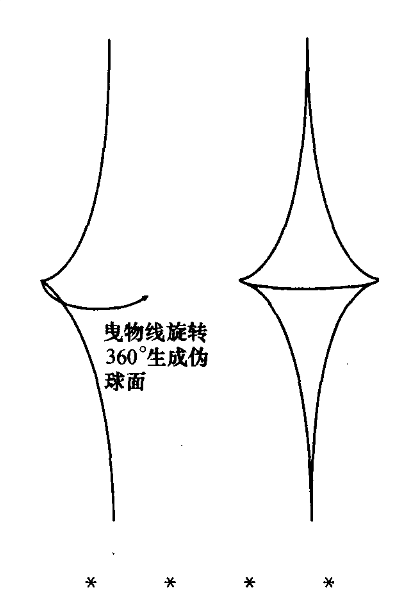
对小范围及大范围几何学的讨论，以及对形状和空间具有普遍意义的优美的拓扑学的讨论给我们提出了一个重要的问题：我们生存的整个宇宙的几何学是怎样的？我们生活在一个巨大的四维球面，还是环面，抑或可能是一个巨大的克莱因瓶中？这是爱因斯坦广义相对论，以及20世纪宇宙学研究提出的最重要的富有哲理的问题之一。

在一种有所限制的意义上，黎曼几何提供了由萨凯里关于钝角的假定导出的非欧几里得几何的模型。二维球面的几何是这种非欧几里得几何的一个模型。这里，一个三角形的内角之和大于180°。这种几何中的“直线”——这个球面上两点间的最短线——是大圆。从北极到赤道由两条纬线和赤道组成的三角形的三个内角之和明显地大于180°。这种几何中的圆的周长小于直径的 π 倍。因此，看做为四维对象的球面提供了这种特殊类型的非欧几里得几何的模型。开的四维欧几里得空间是整个宇宙的另一种可能的模型。但是，我们如何去观察一个在鲍耶和罗巴切夫斯基几何学意义上的非欧几里得的四维空间呢？像前面指出的那样，在这里，三角形的内角之和小于180°并且圆的周长大于直径的 π 倍。平坦的欧几里得空间的曲率为零，球面或椭球面的曲率是一个正数，而鲍耶—罗巴切夫斯基几何的曲率则是负的。我们如何看这样的一个空间？

1868年，意大利数学家欧金尼奥·贝尔特拉米(Eugenio Beltrami, 1835—1900)提供了这种双曲几何的模型。贝尔特拉米也受到黎曼的

研究工作的影响，设法使具有鲍耶—罗巴切夫斯基性质的空间直观化。这个由贝尔特拉米发现的，处处具有负曲率的曲面被他称为伪球面。在某种意义上，它是一个反过来的球面，具有相反的负曲率。伪球面(在三维空间中)可由曳物线旋转产生，如下图所示。

我们四维宇宙的几何学是上面列出的三种类型中的一种的推广。但是，是哪一种？



* * * *

黎曼的不可思议的天才和先见之明并不是没有代价的。因为他如此出色，伟大的高斯鞭策他前进，而他在压力之下完成的工作使数学界——以及整个物理科学——感激他。但是这种压力，施加于一个具有天生的将自己推向极限倾向的人身上，再加上他极差的健康状况，导致黎曼体力上的崩溃。即使是对他的题目为“关于构成几何基础的假设”的任职资格演讲的异乎寻常的赞颂也未能改善他的健康。黎曼写信告诉他父亲，他为任职资格演讲和他在数学物理以及

函数论方面正在进行的研究所必须完成的极为困难的工作使他病了。在气候变好之前几个星期，他无法再做任何事情。为了恢复元气，黎曼租了一个有花园的房子，并尽量在户外度过时光，摆脱那间使人窒息的他曾连续几个小时在那里工作的房间。

紧随任职资格演讲而来的是巨大的学术上的成功。首先，黎曼已能得到8个学生听他的课而不是通常平均的3到4个学生。由于他是由学生付钱的，这意味着他的报酬有不小的增加。1857年，黎曼成为格丁根大学的助理教授，年仅31岁。仅仅两年之后，1859年，黎曼成为格丁根大学有声望的高斯席位的接任者。(高斯在早几年前已去世，当时由狄利克雷接任他的席位。)在格丁根被选为接任高斯席位反映了他的同事们，事实上是整个数学界对黎曼的极大的尊敬。

但是，他的健康状况并无改善，1862年，黎曼再次病倒。他的肺有严重的问题。德国政府资助他到气候温和的意大利旅行以恢复健康。在接着的几年中，黎曼往返于意大利的各个城市和格丁根之间。当他回到格丁根时，他又会病倒，而当他在意大利时，他的健康有所改善。在得知他的这种情况后，比萨大学为他提供了一个教授职位，但是，黎曼拒绝了，并屡次试图恢复他在格丁根的正常的学术活动。他的状况不断地恶化。黎曼在1866年7月，39岁时，因衰竭于意大利北部的马焦雷湖的别墅中逝世。

第八章　柏林：场方程

“在柏林有两类物理学家：一类是爱因斯坦，剩下的则是另一类。”

——鲁道夫·拉登堡(Rudolf Ladenburg)，

“剩余者”之一*

1913年7月3日，柏林的普鲁士科学院以21票对1票的投票接受爱因斯坦为院士。1914年4月6日，爱因斯坦和他全家迁居柏林。

与米列娃分手后，爱因斯坦居住在柏林西南部维尔默斯多夫的中下阶层聚居区维特尔斯巴赫街13号的一套单身汉住房中。这套住房位于一条安静的两旁种着树的街上的一幢建筑式样毫不起眼的多层楼房中。今天，这个地区混居着外国人和土生土长的柏林人。绝大多数的阳台上放着做装饰的种着天竺葵的花盆。这里街道上停放的汽车常常是中小型的廉价日本货，而不是在柏林许多别的地区见到的奔驰和宝马。这座楼房没有什么标志表明20世纪最伟大的物理学家曾

经在这里住过，并在楼上这间普通的住房中完成了神奇的广义相对论。

从住房向东北方向步行 20 分钟就到了库菲尔斯滕大道的上流社区，柏林人钟爱地将库菲尔斯滕大道简称为库大道。这里宽阔热闹的街上曾有过并且现在仍有着各种各样的商店和新潮的咖啡店。东面更远处，越过库大道则是向四方延伸的动物园，欧洲最大的城市中心公园之一。当爱因斯坦希望平静和独处时，他就会到这里来，步行于高大的橡树之间或者坐在有鸭子浮游着的静水边的柳树旁，他一边听着各种各样鸣鸟的欢叫声，一边思索着。他可以沿着动物园宽阔的路径漫步溜达几个小时而几乎碰不到一个人。这里曾经是皇家狩猎场，各种动物自由地出没其间等待皇帝高兴时猎取它们。

如果爱因斯坦选择步行穿过公园向东，那么大约一小时后，他就会发现自己到了柏林市的中心，他在那里的一座雄伟的灰色石头砌成的大楼里工作，这座大楼就是菩提树下街 8 号的普鲁士科学院，整个柏林最为炫耀的所在。这是一座给人印象很深的建筑，其中有个内院，内院中心的喷水池四周安放着一圈长凳。在右边的一块匾上有简短的词句，纪念爱因斯坦在科学院 17 年的任期。在方形内院的内墙上攀生着常春藤。今天这座大楼用做柏林国家图书馆和普鲁士图书馆。

最近的咖啡馆在菩提树下街上离科学院两个街区的地方，接近庄严的勃兰登堡门。它的店名为“Einstein 咖啡馆”。但当我询问侍者这个名字的来历时，他向我保证说：“这与那位物理学家一点关系也没有。”带着浓重的德国口音，他说“Einstein”不过是指“ein-Stein”——德文的意思是一块石头。“你看，”他说，“店主说过这

---

* Philipp Frank, *Einstein: His Life and Times*, New York: Knopf, 1953, p.110.

里曾经只有一块石头，后来他将它建成一个咖啡馆。”在科学院大楼的另一边是属于洪堡大学的一幢大楼，那里有一块大装饰板，记述着在这幢大楼里马克斯·普朗克提出了以他的名字命名的量子论概念，它的符号 h 展示在板上。

随着名望而来的是日渐的富裕，爱因斯坦与埃尔莎结婚后，他们一家搬入位于维尔默斯多夫的东面中产阶级聚居区更靠近中心位置的另一套公寓，在哈贝兰德街 5 号定居下来。今天，一所新的建筑已取代这套公寓所在的高楼，那里并没有标志表明爱因斯坦以前曾在这里住过。街对面有一块匾纪念鲁道夫·布赖特沙伊德(Rudolf Breitscheid)，一位普鲁士部长，他 1932 年至 1933 年曾在这里居住。在哈贝兰德街 5 号附近，一块街标记述着在 1942 年犹太居民曾被切断水和电的供应并被没收财产。柏林，这些日子里，那里的一切正在重建，似乎更急切于纪念的是它对共产主义的胜利而不是它历史上的其他东西。

爱因斯坦慢慢地从他的理论因弗罗因德利希失败的克里米亚远征而未能得到证实这一打击中恢复过来。由于无须为照相底片和天文学的琐碎事情操心，他得以摆脱出来回到他做得最成功的事情上——理论物理。像历史所表明的那样，这是一个完美的决定。广义相对论在 1914 年还远非是完整的理论。因此，尽管世界大战正席卷欧洲，爱因斯坦却极为平静地进行着他的研究。在政治上，他的处境已坏到极点。当时的柏林充斥着仇恨和战争的狂热，排外和反犹太主义正在萌发。如同他后来回忆的那样，爱因斯坦第一次面对反犹太主义幽灵的地方不是只有他一个犹太人的天主教学校，也不是大学预科，甚至也不是布拉格，而是柏林。历史的进程显示这仅仅是这个德国首都向着黑暗深处漫长的坠落的开始。虽然如

此，爱因斯坦在这个战时的都市里却过着惊人的平静而极有成果的生活，甚至能够完善他美妙的理论。

在学术上，尽管有政治和战争，爱因斯坦的境遇却好到了极点。他在柏林的几年中，物理系的行列中有许多世界上最杰出的人物。他们包括普朗克和能斯脱，这一对德国科学的孪生提坦*；马克斯·冯·劳厄(Max von Laue)，X射线衍射的发现者；詹姆斯·夫兰克(James Franck)和古斯塔夫·赫兹(Gustav Hertz)，他们发现高速电子的碰撞产生某些彩色光；还有莉泽·迈特纳(Lise Meitner)，一位维也纳的物理学家，她在对放射性的了解方面作出了重要贡献，爱因斯坦甚至认为她的工作超过了居里夫人。稍后几年，另一位奥地利人，量子理论的开拓者埃尔温·薛定谔(Erwin Schrödinger)也加入了这一群卓越的科学家队伍。

因此，尽管爱因斯坦对普鲁士式的种种现象，他感受到的排外和反犹太主义以及不愉快的战争环境深恶痛绝，但是，他的学术生涯却蒸蒸日上。物理系的教师们在每周的讨论会上相聚，讨论感兴趣的新研究课题，绝大多数的这种讨论会爱因斯坦都参加了，他还常常会提出一些发人深省的问题并且积极参与讨论——不过这一切并没有引起人们对他的特别注意。甚至在他成为国际著名人士后，在柏林逗留期间情况仍然如此。尽管他好交际，有着特有的轻松的笑声和好脾气，尽管他参与各种活动和社交聚会，许多人还是将他描述成一个超然离群的人。有一次，他向一位朋友吐露道："这些金头发神气十足的人使我感到心神不安，他们不懂得别人的心理。"**然而，他

* 提坦，又译泰坦。希腊神话中统治世界的众巨神之一。——译者

** Philipp Frank, *Einstein: His Life and Times*, New York: Knopf, 1957, p.113.

的行为是容易理解的。爱因斯坦现在正处于他创立广义相对论的漫长进程中最后冲刺的阶段。他必须将他的时间花在这个任务上，而将社会责任保持在最低限度上。

最终完成广义相对论的这场冲刺是一个在数学上不断摸索解决这个艰巨深奥的物质和引力之谜的故事，在一个不可思议的月份——1915 年 11 月中，爱因斯坦以惊人的速度完成了它。在这项工作中，爱因斯坦必须纠正他和格罗斯曼在他们 1913 年的工作中犯下的错误，并且要推广爱因斯坦和 A · 福克(A. Fokker)先前完成的进一步工作，福克是瑞士理工学院的一个博士生。从 1915 年的 7 月到 10 月，爱因斯坦深深地忙于对付他在这些早期的共同研究中察觉到的严重的局限性。

他在试图得出关于引力的广义相对论理论时建立的那些方程，没有包括物理学研究所需要的均匀旋转这种可能情形。即使坐标系改变，物理学定律仍然必须成立，因此一个旋转的坐标系应该与一个定常坐标系一样服从相同的定律。第二个问题是，这些方程并没有解释观测到的水星近日点(离太阳最近的点)的进动(在旋转轴的倾斜)总量。第三个问题是，爱因斯坦对理论中的一个技术细节——引力的拉格朗日 * 位势(动力学位势)的惟一性的证明是不对的。第四个问题是，这个问题爱因斯坦并不知道，是他预言的由太阳的引力场引起的光的偏折差一个因子 2。所有这些问题都将在 11 月的一场利用黎曼几何进行的旋风式的数学研究中解决。

11 月 4 日，爱因斯坦提交了一篇关于广义相对论的论文给普鲁士

---

* 拉格朗日(Lagrange，1736—1813)，法国数学家、力学家，变分法奠基人之一。——译者

科学院。这是一篇新的论文，其中的方程是与关于行列式等于 1 的变换协变的。这个技术细节比早些年爱因斯坦—格罗斯曼和爱因斯坦—福克的论文中使用的更为一般。他向科学院承认他对以前建立的方程已经完全失去信心，他早些时候的证明所依据的是一种误解。爱因斯坦认识到，如果他想得到真实地描述引力的方程，则他需要广得多的一般性。在这一点上，他两年前与格罗斯曼的论文中取得的进展是很小的。现在所需要的是在对宇宙定律理论上的了解方面来一个大转变，以及在数学的复杂性方面有一个相应的飞跃。在这方面，爱因斯坦将利用黎曼几何以及意大利数学家里奇、列维-齐维塔和路易吉·比安基(Luigi Bianchi，1856—1928)的工作的巨大威力。比安基建立了爱因斯坦并不知道的张量恒等式——因此他只能在这一个月紧张的工作中自己去发现它们。

爱因斯坦由于似乎是无法逾越的技术上的困难而感到惊惶。11 月 1 日，在狂热地研究这个问题时，他不经意地倒退了一步。由于对他的方程加上了一个不是必需的严格的条件，爱因斯坦最终又得到了他一星期前得到过的那个完全不合用的同样的方程。他又退回到了原地。

11 月 18 日，爱因斯坦加上了一个称为单模不变性的条件并做了一些数学推导，似乎进入了一个新的境界。使他大为震惊并愉快的是，他发现这个新理论精确地解释了水星近日点的移动量。他的基于这一理论的计算，与天文学家们一直在观察的水星轨道相一致。爱因斯坦终于至少部分地得到了对他的理论的一种确确实实的肯定。“好几天我都欣喜若狂，”他在一封给埃伦费斯特的信中这样写道。后来，他利用了弗罗因德利希收集天文学结果而编成的册子，在一个出版物中使用他的理论解释了水星近日点的岁差。

尽管广义相对论——还处于刚采用的最终定型之前的形式——的

确解释了一个重要的、多年的天文学之谜，但是这个发现本身还不足以将相对论推上世界舞台。 这个荣誉将属于爱因斯坦长期以来一直最关心的现象：空间的弯曲，它引起光线绕着它的看不见的轮廓线弯曲。 正是在这一点上，在差不多与爱因斯坦解释近日点问题的同一时间，理论上的一个大突破出现了。 11月18日，爱因斯坦在他的论文中用了半页宣布了由他的改进过的描述引力场的方程得出的第二个发现：在7年前假设的正好擦过太阳边沿的光线的偏折大小应该是1.75弧秒，而不是这个量的一半。 在这里，爱因斯坦利用了空间本身是因引力场而弯曲的这个思想，而不是利用牛顿的引力思想再加上将光量子——光子——视为具有质量的粒子这个特点。

爱因斯坦继续狂热地工作——他现在已是非常、非常接近那个最终的描述引力场如何扭曲空间-时间结构的方程。 他知道在这点上他有着激烈的竞争，以及来自许多科学家的致命的反对。 这些人包括马克斯·亚伯拉罕(Max Abraham，1875—1922)，他在哲学上反对相对性；古斯塔夫·米(Gustav Mie，1868—1957)，他发展了一种不同的试图解释质量和引力如何与电磁现象相互作用的理论；还有爱因斯坦的坚定的竞争对手努德斯特伦，他的理论与爱因斯坦的理论具有某种相似性，但是缺少相对论的那种完美的力量并且被历史证明是不适用的。 1914年8月7日，爱因斯坦写信给弗罗因德利希，痛苦地抱怨他的一些反对者以及他们的理论：“想一下努德斯特伦的引力理论，其中光线的逐次变宽并不重要，谁都明白它是在先验的四维欧几里得空间上构造的，在我看来这是一种迷信。 最近米对我的理论发起了恶意的攻击，可以很清楚地发现其中有不少以前的观点。 我很高兴看到这样的事实，就是我们的同事们之所以热心于我的理论，只是为了希望扼杀它。”

现在一年之后，爱因斯坦在无意之中正在为自己树立另一个对

手——一位爱因斯坦与他关系很好的杰出的数学家，这就是著名的大卫·希尔伯特(David Hilbert，1862—1943)。11月7日，爱因斯坦将他的论文的清样寄给希尔伯特，在这篇论文中，他推导了引力方程并已认识到他以前的方法是错的。* 然后，他继续将包含他所涉及的方程的推导的论文寄给希尔伯特，并且大家知道，当爱因斯坦在格丁根做关于他对广义相对论的继续研究的报告时，希尔伯特在场，希尔伯特是格丁根大学的数学教授。后来，希尔伯特就爱因斯坦对近日点的进动原因所作出的突破性发现向他祝贺。在已经看到和听到爱因斯坦向他解释他的工作之后，希尔伯特仍然将他自己的包含与爱因斯坦的最终方程非常相似的方程的论文提交给格丁根大学。8年后，一个科学委员会明确地澄清了有关这两位学者抄袭对方为自己所用的一切嫌疑。希尔伯特的方程被判定为对爱因斯坦场方程的一种有趣的注释，因为爱因斯坦的推导是前后一致的、完整的并且是完全正确的。希尔伯特的工作是对爱因斯坦的宏大蓝图从数学角度所作的部分的精妙阐述。

希尔伯特在1917年写到他在格丁根的工作得到埃米·诺德(Emmy Nöther，1882—1935)很大的帮助，诺德在广义相对论的结果建立之后继续与他合作。但是爱因斯坦也得到诺德的工作的帮助，在诺德于1935年去世后，他赞颂说："根据健在的最有资格的数学家的看法，诺德小姐是自从对妇女的高等教育开始以来最重要的富有创造性的数学天才。"**

爱因斯坦有很好的理由为埃米·诺德歌功颂德，因为正是她的定

---

* Abraham Pais，'*Subtle is the Lord...*'，New York：Oxford University Press，1982，p.259.

** Ibid.，p.276.

理使爱因斯坦得以导出引力场方程的两个重要结果：第一个是能量—动量张量 T 的守恒关系。这是场方程的合理的物理性质，但是，爱因斯坦最初论证它的真实性时使用的是错误的数学坐标条件。第二个结果称为缩并的比安基恒等式。这些恒等式构成满足曲率张量的重要的特殊条件。这些恒等式保证广义协变性得以保持：即使坐标系正在运动，曲率仍能使物理定律保持不变。在爱因斯坦自己推导这涉及里奇张量和度量张量 g 的关系式时，这些关系已经在 1880 年由德国数学家奥雷尔 · 福斯(Aurel Voss， 1845—1931)推导而得，不过他的证明在当时没有引起注意，因此，这个定理就被意大利数学家路易吉 · 比安基重新发现。这两个结果都是诺德的大定理的推论。有趣的是埃米 · 诺德就这样——在第一种情形下是直接地，在第二种情形下则是间接地——帮助了这两位在寻求广义相对论方程的竞赛中的对手：希尔伯特和爱因斯坦。

1997 年，对场方程的优先权的争议经过 L · 科里(L. Corry)、J · 雷恩和 J · 施塔赫尔的研究得到了一个确定的结论(“关于希尔伯特—爱因斯坦优先权争议的延误了的决定”，载《科学》杂志第 278 期，1997 年 11 月 14 日，第 1270—1273 页)。作者们对档案做了研究，披露了迄今为止未被注意到的希尔伯特送交格丁根科学协会杂志的手稿的原始清样，杂志收到的日期是 1915 年 12 月 16 日。这份手稿排除了爱因斯坦剽窃希尔伯特工作的任何可能性，并进一步证明了爱因斯坦正确地推导了方程，而直到爱因斯坦的工作成果发表之前，希尔伯特的推导并没有最终导出正确的方程。在清样中，希尔伯特说他的方程不是广义协变的，而广义协变则是相对论范畴中正确描述引力问题所必需的。

爱因斯坦的场方程有 10 个分量，这一点可以通过考察四维时空

变量彼此间的影响关系搞清楚，然后去掉多余的一些分量($4\times4-6=10$)得到。然而，希尔伯特导出的引力方程则有14个分量，多出来的4个分量则如他自己指出的那样不是协变的。希尔伯特需要这4个多出来的分量来保证他的方程中的因果性质。这样一来，他失去了重要的协变性——这意味着他的方程具有讨厌的对坐标系的依赖性——这是完善的物理定律所不允许的。另一方面，爱因斯坦只用10个分量就把方程做对了。当爱因斯坦的论文发表时，希尔伯特称没有必要去做计算以得到有10个分量的完全协变的方程。后来，他收回了这个主张，承认爱因斯坦的工作是实质性的。

这里有一个数学上的窍门，爱因斯坦这位物理学家懂，而希尔伯特——永恒的最伟大的数学家之一——却不懂。这就是对基本张量、里奇张量的缩并，再将由此所得的迹加入到方程中去。希尔伯特只是在他看到爱因斯坦的论文之后才懂得这一点，而爱因斯坦的论文是希尔伯特在论文发表之前向爱因斯坦索要的。因此，尽管希尔伯特的论文发表在爱因斯坦的论文之前，但是希尔伯特的原稿是有缺陷的，只是他在看到爱因斯坦的完全正确的论文之后做了改正。可以理解，爱因斯坦对于一个他信任的同事的他确信为剽窃的行为非常气愤。然而，他的愤怒终于平静下来，1915年12月20日，爱因斯坦写信给希尔伯特："我们之间有着某种怨恨，我一直在与由此而引起的痛苦情感抗争并且完全成功。现在我对您的好感一如既往，我请求您抱有与我同样的愿望。"科里、雷恩和施塔赫尔的文章使问题消除了，广义相对论属于爱因斯坦，并且只属于爱因斯坦一个人。

*　　*　　*　　*

科学史家们面临着一个使人气馁的任务：设法重现爱因斯坦对广义相对论定律的发现过程。在编辑《阿尔贝特·爱因斯坦论文集》时——这是由约翰·施塔赫尔和他的同事们在最近几年中从事的一个连续多卷本的项目——研究者们偶然发现了一本含有爱因斯坦手写注记的笔记本，这是他在1912年夏天至1913年春天在苏黎世时使用的笔记本。1984年，施塔赫尔的合作者约翰·诺顿(John Norton)发表了一篇论文——根据对这本苏黎世笔记本的分析——纠正了关于爱因斯坦的通向广义相对论的曲折道路的一些误解。然而，这本笔记本的某些部分对于当代的研究者来说仍然是晦涩难解的。1997年，于尔根·雷恩和蒂尔曼·绍尔(Tilman Sauer)对苏黎世笔记本进行了系统的分析，试图彻底了解它。笔记本有一个标题页“相对性”，包含了84页短的注记、方程以及计算，有的有很少的解释，有的没有解释。因此分析必须依靠对方程背后的真正的物理学和数学的基本了解。研究者们逐条浏览了爱因斯坦简短的笔记，试图再现他的思维过程。分析显露了一个意想不到的结果：1912年，爱因斯坦已经写下了与他3年后正式导出的最终的引力场方程相接近的方程。这是怎样发生的呢?

爱因斯坦起先的几步并没有什么把握。他从写出黎曼的距离元素着手，但是没有使用这个记号而使用了一个大写的“G”代表度量张量，他只是在笔记本的后面部分才将它改写成标准的小写字母“g”。接着爱因斯坦展现了各种各样的方程和一些数学上的处理，尝试将度量张量、引力元素以及四维狭义相对论的框架组合在一起。突然地出现了真正的引力场方程的一种线性形式。但是，显然爱因斯坦认为这个方程是不对的——有些项他认为使人很担心，因为它们不满足所有的要求。他放弃了，结果就导致他以后几年的研究不断

地从一个死胡同走向另一个死胡同。1915年，可能还没有意识到他已经在3年前就得到了这个方程，他再次推导出了它——这一次是十全十美的形式，满足他所有的条件。

在他的推导中，爱因斯坦使用了黎曼度量张量——弯曲空间中距离的测度：$g_{\mu\nu}$。他的方程也包括了能量—动量张量 T、处理时空弯曲的里奇张量 R，以及牛顿的引力常数 G 和数 8 及 π。尽管这些组成了一套方程(这是因为每一个张量包含几个元素)，但是将记号浓缩为张量后就可以将它们写成在数学上既简明又漂亮的单个的方程。爱因斯坦依然陶醉于他对水星近日点移动问题的解释之中，在他的脑海中和纸上，他熟练地处理着这些张量和数量(数，不是张量，诸如上面的8和 π)。最后的冲刺花了他极紧张的整整一周。到1915年11月25日，爱因斯坦面前放着描述空间和时间以及由引力而产生的弯曲的最终形式的方程，包括它涉及的关系式。他写下了：

$$R_{\mu\nu} - 1/2\, g_{\mu\nu} R = -8\pi G T_{\mu\nu}$$

1916年3月20日，爱因斯坦给《物理学年刊》杂志寄去了包含他对完整的广义相对论的系统推导和阐述的论文。1916年下半年，这篇文章增加了内容后成为爱因斯坦的第一本书。

一个方程是一组安排在等号(=)两边的数学符号和数字。方程描述了这个方程中出现的所有的量之间必须成立的一种关系。但是，方程本身并没有提供解。方程必须被解出。一当爱因斯坦列出他的将决定宇宙性质的各种量联系起来的(张量)方程时，剩下的任务就是解这个方程。在某种意义上，这是爱因斯坦向科学界提出的挑战——解我的方程去了解有关的大自然的定律。解爱因斯坦的场方

程意味着寻找满足这个方程的度量，这意味着决定对这个方程所支配的任何情形都适用的黎曼度量 ds^2。

一旦得到“线元” ds^2，你就知道了形状，即在适用爱因斯坦方程的这个特定情形中时空的弯曲。你就知道这个弯曲空间中“直线”看上去是怎么样的，以及什么“曲线”构成两点之间的最短路径。例如，如果将爱因斯坦方程应用于球面，就会发现在这个空间中最短距离的“线”是大圆，就像飞行员和航海者都知道的那样。当然，这个方程适用于引力起作用的更为复杂的空间。它说明引力本身是如何迫使空间弯曲的。

由爱因斯坦提出他的方程而开动的进程继续到我们这个时代——并且不断地深化。爱因斯坦方程的解已经引导我们发现了方程所预言的一些奇妙的现象。这些现象包括引力波、空间的扭曲、“惯性系拖延”现象——在这种现象中自旋的大质量物体周围的时空也跟着回旋，更不必说还有近日点问题、引力红移和光的弯曲。而爱因斯坦方程的第一个解(爱因斯坦自己的说明红移、光的弯曲以及他独自决定的别的效应的那些解除外)是由第一次世界大战中的一名士兵还在广义相对论完成之前就提出的。

1916年1月16日，以及1916年2月24日，爱因斯坦在普鲁士科学院宣读了由卡尔·史瓦西(Karl Schwarzschild，1873—1916)写的两篇论文，史瓦西是杰出的德国天文学家和波茨坦天文台台长，他是解爱因斯坦引力场方程的第一人。史瓦西的解后来导致人们对黑洞的了解，并在极大程度上决定了爱因斯坦场方程对宇宙学的强大影响。史瓦西未能在科学院宣读他自己的论文，因为当时他正衰弱无力地呆在第一次世界大战东线战场的战壕里。在战场上，面对着俄国人，史瓦西阅读了爱因斯坦的写有方程的论文并且解答了方程，他将解寄

给在柏林的爱因斯坦。1916年5月11日，史瓦西因在前线感染疾病而去世。6月29日，爱因斯坦在普鲁士科学院宣读了史瓦西的讣告。

1916年5月5日，爱因斯坦接替普朗克当选为德国物理学会的主席。他在柏林和其他地方的科学界同行现在已开始对他怀有崇高的敬意。他导出的广义相对论定律在理论上是完美无缺的，这个工作的质量受到科学家们的注目。但是爱因斯坦仍然没有实现他最需要的事：对光线在太阳附近偏折的观测证明。为了使他的工作从一种漂亮的理论转换成对宇宙规律真实的刻画需要这最终的一步。为了这一步他还必须再等待3年。其间，爱因斯坦继续他的研究，硕果累累。他写了一篇描述引力波现象的论文。爱因斯坦解他的方程并发现引力本身会产生波，这种波既看不见又感觉不到，但是通过非常敏感的仪器可能探测得到。许多科学家曾花了许多时间、精力和财力设法探测引力波。我们正在接近这一发现，因为仪器越来越好并且我们已开始使用太空作为实验室。

1916年7月，爱因斯坦回过头来研究量子力学中的问题。在几个月中，他写了三篇这个课题方面的论文，其中一篇提供了普朗克定律的新的推导方法。正是在这期间，他在量子力学领域中的研究首次使他产生对于量子论天生具有的概率论外貌明显的疑虑，这种疑虑将伴随他终身。他的心神不安导致他说了一句经常被引用的话："我永远不会相信上帝会和世人掷骰子。"12月，根据皇帝的法令，爱因斯坦进入皇家物理技术研究院的董事会，他在这个位置上一直呆到他因希特勒的崛起而离开德国。

第九章　普林西比岛，1919 年

“《泰晤士报》中对我和我的处境的描写展现了作者炫耀得使人发笑的想像力。为使相对论适合读者的情趣，今天在德国我被称为德国的科学家，而在英国则被介绍为是一个瑞士犹太人。假如我到了被视为‘眼中钉’的地步，那么这种描述会倒过来，对德国来说，我将成为一个瑞士犹太人，而对英国而言，我则是一个德国人。”

——阿尔贝特·爱因斯坦给伦敦《泰晤士报》的一封信，1919 年 11 月 28 日

战争使科学家之间的信息交流非常困难。在爱因斯坦发表完整的广义相对论之后不久，荷兰天体物理学家威廉·德西特(Willem de Sitter，1872—1934)得到了这篇论文。他知道在英吉利海峡的那一边，另一位名声显赫的天体物理学家一定会很乐意读到爱因斯坦奇妙的理论——并且，他比其他人更能确切地领悟爱因斯坦的杰作的复杂

难懂的细节。但是怎么能做到呢？战争正在蔓延，要将一个文件送到英国并不容易。德西特设想了一个秘密计划，设法将爱因斯坦的论文走私进英国，并一路送到伦敦，最后送达收件人：阿瑟·爱丁顿(1882—1944)。

阿瑟·爱丁顿于1882年12月20日生于英国威斯特摩兰的肯德尔，他的父亲是当地学校的校长。当这个小孩只有2岁时，他的父亲就去世了，他的母亲和她的两个孩子迁居到威斯顿镇。爱丁顿长大时显露出对大数字的强烈爱好。* 在非常小的年纪他就能背诵24×24乘法表。这种对大数字的爱好也是将他引往天文学的一个原因。在做演讲时，他常常会将大的数目中的每个数字写在黑板上(而不是使用通常那种指数形式的科学记数法)。他的传记作者昌德拉塞卡(Chandrasekhar)回忆起在1926年牛津的一次演讲中，爱丁顿在黑板上将估计的太阳质量以吨为单位写成2,000,000,000,000,000,000,000,000,000。

爱丁顿在曼彻斯特的欧文斯学院受教育，于1903年从那里毕业，并进入剑桥攻读博士学位。1907年他获得史密斯奖并当选为三一学院的研究员。同一年，应皇家天文学家威廉·克里斯蒂(William Christie)爵士的邀请，爱丁顿成为格林威治天文台的成员。1912年，他当选为剑桥大学的普卢米安讲座教授。1914年，爱丁顿成为剑桥大学天文台台长。以后的30年中他一直担任这两个受人尊敬的职务。爱丁顿收到爱因斯坦的论文就立即被它吸引住了。他十分清楚这篇论文讲些什么。

从中立的瑞士，爱因斯坦利用瑞士人的渠道曾将他的一篇论文送

---

* S. Chandrasekhar, *Eddington: The Most Distinguished Astrophysicist of His Time*, London: Cambridge University Press, 1975.

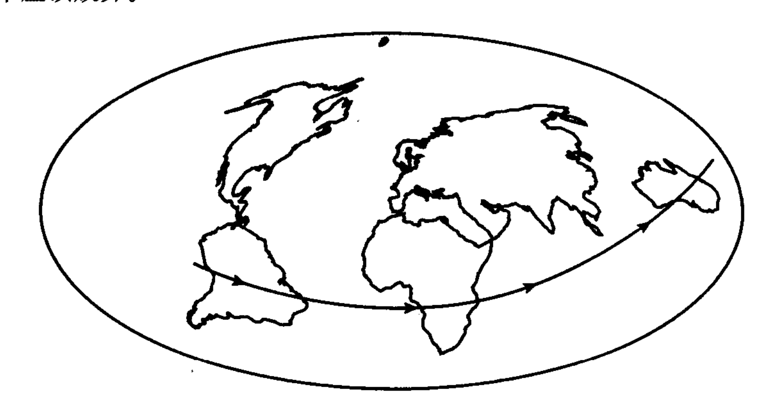
往英国，但是，显然由德西特送给爱丁顿的一篇论文是在战争结束之前到达英国的惟一的一篇论文。德西特在寄给爱丁顿论文时还附带送给天文学会三篇他自己的关于广义相对论的论文。其中的一篇论述宇宙学的论文对于爱因斯坦关于宇宙学的工作，以及后来几十年的宇宙学领域的进程具有极大的促进作用。爱丁顿尽其全力在英国和美国传播爱因斯坦的重要理论。

爱丁顿准备了一篇题为“关于引力的相对性理论的报告”的论文，该论文于1918年在伦敦发表并在西方科学界广泛流传。爱丁顿是相对论的热情的皈依者。作为一位具有非凡才华的理论物理学家，他立即十分赏识这个理论本身的优美和它的逻辑基础。爱丁顿——这位天文学家——看不出有任何理由需要再去寻求这个漂亮的描述宇宙法则的方程的物理验证。对他来说，这个方程是毋庸置疑的。令人啼笑皆非的是，就是这个人，阿瑟·爱丁顿，他对广义相对论的准确性无比信任但却要去使用物理测量向世人证明这一点。不过求证的想法却是另有来源，并且要归功于战时英国的一连串侥幸成功的事件。

爱丁顿是一个贵格会教徒，因而像爱因斯坦一样是一位和平主义者。1917年，由于需要更多的人去作战，英国将征兵年龄的上限提高到35岁。爱丁顿当时是34岁，属于应征范围，但是他会拒绝参军，因为他是一名自觉的反战者。这给三一学院的校方出了个难题。如果爱丁顿拒绝应征，他可能被逮捕并被送到英国北方的拘留营，在那里他的许多贵格会朋友正在削着土豆皮度过战争岁月。这将使学院、天文台和英国科学界感到极大的难堪。必须而且要迅速地在爱丁顿接到征兵令之前采取某种措施。

从爱丁顿那里知悉爱因斯坦论文的那些英国天文学家和物理学家

也知道通过在日食期间观测光线的弯曲来验证广义相对论的预言的可能性，就像弗罗因德利希在战争初期曾尝试去做的那样。1917年3月，当时的皇家天文学家弗兰克·戴森(Frank Dyson)爵士向科学家们指出：1919年5月29日将有一次日全食。这次日食在欧洲观测不到，但是在大西洋上一个包括巴西的一个区域，以及西非沿海的叫做普林西比的热带小岛在内的带形区可以观测到。戴森特别提到，这次日食由于涉及到一些星座特别有利于检测在被遮住的太阳边缘旁的星光弯曲。在这次日食期间，太阳和月亮将处于金牛座的中心，而具有众多星团的毕星团就在金牛座的中心。他认为这样的极佳机会不应该放弃。



但是世界正处于战争之中，派遣一支英国远征队远道前往赤道非洲海岸或巴西去是困难的。即使战争结束，这样的远征也难于办到，仍然有极大的风险和许多磨难。不过，在变化多端的时期，为探求知识而去遥远的、充满潜在危险的地方进行一次远征这种想法对喜爱冒险的人来说有着无比的吸引力。戴森对此感到兴趣。此外，他还有另一个始终在斗争着的问题：爱丁顿和他的良心。戴森设计了一个确实有点不光明正大的计划——一个可以同时解决这两个问题的计划。

作为皇家天文学家，戴森和英国海军部有很好的关系。他向海军部提出了一个不寻常的请求。首先，他向他们解释了广义相对论(这是由一个“敌方的科学家”提出的理论——爱因斯坦迁居到柏林必须重新承认他的德国国籍)对于科学的巨大重要性，以及在日食期间对它的验证可能会向科学提供难以置信的机遇。接着，他论证了阿瑟·爱丁顿是能完成这种验证的惟一的一位西方科学家。很可能戴森还使用了一些带有爱国主义色彩的理由：在《光学》一书中，伊萨克·牛顿爵士含义隐晦地询问：“难道不是物体远距离地作用于光线并且这种作用使光线弯曲的吗?”显然，光线是否会因物体的作用而弯曲这个问题是几百年前这位伟大的英国科学家想要知道的事情。总之，戴森成功地和海军部以及英国武装部队做了交易：爱丁顿在战争期间将不被征召服役，但是，为了在日食期间检测广义相对论，他必须准备做一次到热带的远征。此外，如果战争于日食的那天，1919年5月29日之前结束，那么——作为替代军事服役而对大不列颠王国的服务——爱丁顿必须领导这次远征。交易达成了，爱丁顿未被征召参军。

1918年11月11日，停战协定终止了第一次世界大战的流血。接着在1919年1月18日，巴黎和会在奥尔赛码头开幕，参战国的代表开始制定他们的协定。战争结束了，因此在5月份日食期间测量光线弯曲的远征可以进行了。在准备这次科学冒险的计划中，这位皇家天文学家得到了来自英国政府的支持这种努力的资助，他和爱丁顿花了许多时间仔细考虑了所计划的远征的细节。阿瑟·爱丁顿后来将准备这次历程的这些日子描述为他一生中最令人兴奋的日子。而事实上，在那段因大战而造成的世界范围的紧缩日子里，又有多少天文学家或别的科学家打算去一个僻静而又神秘的热带岛屿呢?

对标有预期的日食发生路径的地图反复钻研后，为了使成功的可能性达到最大限度，戴森和爱丁顿决定应该派两个小组去——两个不同的地点——使至少有一个组能有机会碰上好天气(日食时可能云层密布，尤其是在热带)，以及至少可以得到一张显示某些接近太阳的星球的好照片。1919年5月29日的日食路径将沿着从西南向东北的对角线穿越大西洋。于是，两个地点中的一个是在巴西，另一个则是越过大西洋在非洲海岸附近。天文学家找到的合意的两个地点是索布拉尔，它在巴西北部的亚马孙地区的塞阿拉州的一个荒芜地带，而越过大西洋的则是普林西比岛。每一个地点由一个天文台的成员来实施。巴西将是来自格林威治天文台的以A·C·D·克罗姆林(A. C. D. Crommelin)为首的小组的目的地，普林西比岛则由剑桥天文台的小组负责，这个小组由阿瑟·爱丁顿领导。

这两个远征队在1919年3月8日一起登上英国皇家海军“安塞尔姆号”离开利物浦港，驶向北大西洋的马德拉岛。在那里这两个小组分道扬镳。朝巴西方向的小组继续乘坐“安塞尔姆号”在3月23日到达帕拉。在那里他们有一种选择：他们可以继续乘船驶向索布拉尔或者在那里等待，等到“安塞尔姆号”返回英格兰途经时再登船于几星期后到达索布拉尔。由于他们发现自己处在亚马孙丛林中的未开发地带，他们选择在船上等待。到船回到帕拉时，将有指示给他们，告知他们如何行动。这个指示由莫里兹(Morize)博士用电报发出，他和巴西政府有联系并有影响力。电报传达的内容和指示，以及给一位政府官员的引见信使克罗姆林和他的小组在与海关官员打交道时能够得到帮助——他们带着庞大的装备一起到达，尤其需要这种帮助。

在卡莫辛，这些天文学家和技术人员受到一位当地官员的接待，他帮助他们安排让人将装备送上经过丛林到索布拉尔的火车。当火

车驶进车站时，当地居民包围了火车。在他们从火车上卸下那些古怪的新发明玩意儿时，当地人好奇地注视着这些穿着殖民地丛林服装的英国科学家。这个地区的宗教领袖和公众领袖出来向这些外国人致意，随即索布拉尔的行政长官维森特·萨博亚(Vicente Saboya)上校也来了。他对这些来访者表示欢迎，接着对正拿着他们的装备的那些当地的搬运工人发布命令并将整个团队带向他家。

很快，当地木工就努力地伐树锯木，准备大型的V-形支柱并将它们安置在坚固的木线桥上，它们是用来夹住望远镜管使它与水平线成一个正确的角度，这样在太阳日食期间可以观察到7颗星。望远镜的位置就在萨博亚上校提供给小组的房子的正前方。泥地中正在建造一个凸式码头和一些棚屋供天文学家们使用。校正和检验仪器花费了许多时间和精力。为了解决在日食期间太阳偏角变化的问题，制作了专门的槽，镜管的木头V-形支柱可以在其中滑动以改变方位角。小组使用了一根19码长的镜管和直径为16英寸的镜头。用来拍摄日食的照相底版有8英寸大小。

天文学家们利用明亮的红色大角星(牧夫座α星)替望远镜聚焦，在每次对整个观察范围曝光时都略微改变钴玻璃目镜的焦距，通过这样的方式做了一系列的曝光。然后对相片做了仔细的检查以找到在即将来临的日食的珍贵时刻使用的最佳焦距。一当这个焦距被确定，就将后端牢牢地固紧，避免以后位置可能移动。

在索布拉尔的英国小组接着不得不集中精力研究和分析气象。这是非常重要的，因为天气可以使整个计划成功或失败。小组显然明智地选择了安装望远镜的地点，尽管初看起来将大型望远镜安置在丛林的定居区的房子前似乎是愚蠢的，因为2700英尺高的梅鲁奥卡山耸立在西北方向只有6英里远的地方——依然处于日食路线上——并且合

乎逻辑的做法似乎是应该将望远镜安装在高山之顶。但是如同实际情况表明的那样，科学家们立刻发现这座山是这个地区中云层极易集聚的地方，它的最高处经常笼罩在云雾中。然而，在低处的索布拉尔镇，好天气使科学家们和他们的望远镜在绝大多数时间中保持干燥。

气温始终如一地每天在早晨5时的75度左右至下午3时的97度上下之间变化。他们也注意到在这些日子里气压很奇怪地从不变化。然而，在5月25日——离日食只差4天——有一场大雨。科学家们焦急地想搞清楚这是天气转变的信号还是只不过一场路过的暴风雨。而同时他们欢迎下雨，雨水会湿润地面并涤清空气中的许多尘埃。当他们等待时，每天都有一群当地人围着他们的营地。有人告诉这些当地人说，这些陌生人到这里来是为了看太阳变黑和白天变成黑夜。难道这种可怕的事真的会发生吗？当科学家们绕着阴沉地瞄准天空的望远镜管打转时，这些当地人带着畏惧的表情在旁观看着。

当英舰“安塞尔姆号”到达马德拉时，目的地为普林西比岛的阿瑟·爱丁顿和他的小组与他们在“安塞尔姆号”上的同事分手告别，然后下船。他们在这个葡属岛屿上逗留了几周，等待将他们带往目的地的船。科学家们在丰沙尔城中他们所住的旅馆周围闲荡，参观葱翠的菠萝种植园以及这个多山的绿岛上的渔村以消磨时光。到目前为止，如果这就算是爱丁顿作为不用在第一次世界大战的战壕中挨炸的替代而必须为他的国家所作的服务，那么他正干得不坏。4月9日，货运船“葡萄牙号”入港，英国小组搭乘它起航向南驶向位于西非的赤道几内亚沿海的赤道北纬1度的普林西比岛。当时的普林西比岛以及邻近的圣多美岛都属于葡萄牙殖民地。*

---

* 这两个岛在1975年从葡萄牙手中获得独立。

1919年4月23日凌晨，“葡萄牙号”进入普林西比岛的圣安东尼奥小港，当船接近海岸时，乘客们见到的是一块看似热带乐园的地方。海滩上有着成行的扇形叶子的棕榈树，沙滩是白色的，海水的颜色在绿松石色与碧玉色之间变幻不定。(几十年后，这块完美的海滩成为著名的巴卡迪电视广告节目的拍摄地点。)在海滩后面，旅游者可以看到地形变高，覆盖着茂盛的热带雨林，更远的高处是两座火山，火山顶峰被云层笼罩，在太阳升起时云层看上去呈紫红色。当船接近码头时，他们听到近处浓密的雨林的树上众多鸟儿的鸣叫声——这个岛有26种当地特有的鸟种和126种别的已查明的鸟种。在他们周围，可以看到木质独木舟在夜间捕鱼后返家，满载着枪鱼、旗鱼和 。渔场中的鱼如此之多以至于岛民只要使用末端散开的无饵的绳子简单地缠绊那些鱼就可以将它们拖上来。这地方真是一个天堂。

但是普林西比岛有一个秘密。它直到当时才结束作为奴隶殖民地的几百年历史。奴隶们处于非人道的状态，在岛内的可可树和香蕉种植园中做工，那里有几千个奴隶死于艰苦的劳动、饥饿和疾病。这是地球上在19世纪取缔的奴隶交易的最后一个地方。这些旅行者后来看到的另一个海滩叫做愚人滩——因为葡萄牙人认为那些逃亡奴隶居住在这个海滩上是不可能存活下来的。岛上有着它残忍的过去的一些遗迹。它还有着剧毒的毒蛇和疟疾。

爱丁顿和他的小组下船后，正注视着当地搬运工人卸载他们的装备时，见到了葡萄牙殖民官员的一个代表团。他们全体人员向科学家们保证支持并提供帮助。为英国小组与这些正在巴结英国科学家们的当地官员取得联系的是国立里斯本天文台的海军中将坎波斯·罗德里格斯(Campos Rodrigues)。为表示友好，葡萄牙政府豁免了对这

些来访者繁多行李的应有的海关检查。

小组乘坐几辆早期的四轮驱动车辆全面考察了这个10英里长，6英里宽的岛屿，寻找观察日食的合适地点。他们看了岛内许多的可可树种植园，这些种植园归葡萄牙殖民者所有并由当地黑人在那里劳动，其中一些人是解放的奴隶或奴隶的后代。经过几天的勘测和穿越浓密的丛林之后，爱丁顿决定了一个地点：罗卡顺迪，它地处岛的西北方，可以从500英尺高处俯瞰大西洋。

然后，小组的沉重的行李在4月28日从圣安东尼奥运到了罗卡顺迪。在大部分行程中它们是用车辆运送的，但是最后的一公里路载着较重装备的车辆无法通过。在浓密的树林中，在泥泞的蚊子大批出没的地面上，沉重的装备被卸下并放到许多土人的裸背上。就在他们居住的房子前面，小组建立了一块用墙围起来的场地，他们将在那里把望远镜安置在陡峭地向海面倾斜的地上，方向指向日食期间太阳所在的方位。这样可以毫无阻挡地观测天空。在度过一周兴奋的准备工作之后——像差不多同时在大洋对面索布拉尔所作的一样，当地木工准备了类似的用于支撑望远镜和重物的V-形支柱并做了调整——小组返回圣安东尼奥。他们呆在那里，度过了5月6日至13日的一周，因为爱丁顿认定在潮湿天气过早地打开望远镜的镜头是不明智的。当小组在5月16日返回罗卡顺迪时，做了首次拍摄以测试望远镜和拍摄设备的功能。爱丁顿希望使失误尽可能的小。5月19日，日食的日子，将是他生命中决定性的一天。

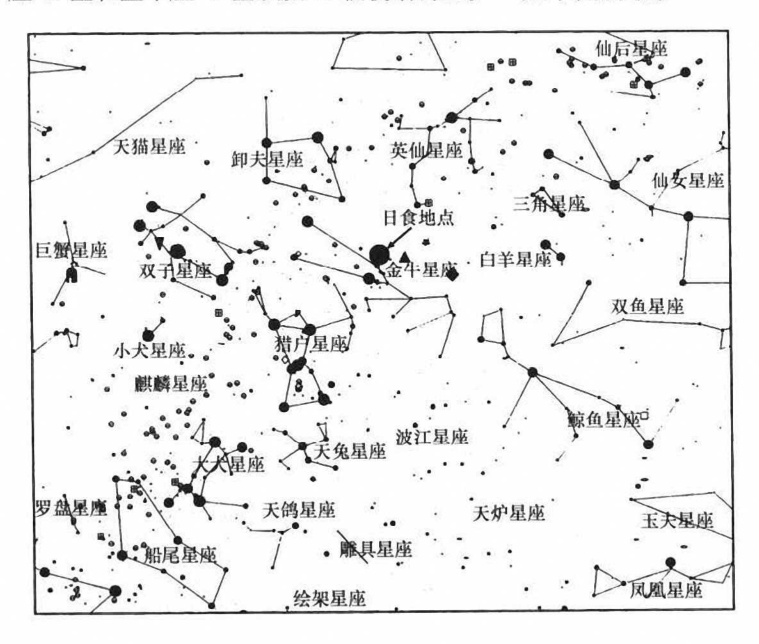
爱丁顿成百遍地仔细重温：如果天气容许实验不受云层或能见度差的干扰而进行的话，实验可能会有的种种结果。实验可能有3种完全不同的结果：1.没发现任何东西——在日食期间星体的表观位置没有改变。这将意味着光线不弯曲；2.星体的位置有移动——光线弯

曲——但是其大小为将光看做粒子时牛顿理论所预言的大小；3.星光发生完全如爱因斯坦所预言的那样大小的弯曲。第一种可能性将意味着没有任何结果；第二种可能性将意味着在光可以被视为是粒子这一额外的假定下，牛顿是赢家，而英国因为他也成为赢家；第三种可能性则是爱因斯坦和他的关于物理学和宇宙的革命性理论获胜，而不是牛顿。爱丁顿知道他的英国的爱国同胞希望第二种可能性被证实。但是，他深信爱因斯坦。他热爱相对论——他懂得相对论，和远在几千英里外并且对正在普林西比岛和索布拉尔进行的影响重大的准备工作毫无所知的爱因斯坦一样，对他来说，上帝必须按照广义相对论来运转整个宇宙。爱丁顿等待着这重大的日子到来，他渴望好天气并为此祈祷。

在日食前的几天里云层很浓密。5月29日的上午，从早上10时到11时半下着大雷雨——这在每年的这个时候是难得出现的。接着吉兆——太阳露了几次面。但是马上云层又集聚起来。按计算，日食的时间是格林威治平时(GMT)下午2时13分5秒到2时18分7秒(当地时间要迟1个小时)。到下午1时55分(GMT)，当云层经过时，可以看到月牙形的太阳时隐时现。在那种场合，光的独特的性质——以及日食观测者们因之而体验到的胆怯不安的感受——得到了充分的展现。从绝大部分被遮盖的太阳发出的光线呈现一种透明感。它有如透过一块幕布观看景色。幕布慢慢地变得越来越不透明。云层依然在上空飘移。接着，就在日全食发生之前，云层飘走了，使太阳再次露面。突然间，一个巨大的阴影从水面方向腾空向前飞跃，将观测者吞没在阴影之中。日全食开始了。向上方看去，观测者们被大自然的威力惊呆了。即使是极有经验的日食观测者，每当他们看新的日食也会深受震动。在云层之间，它们分开的时间

刚好能使摄影完成，正在向上看着天空的天文学家们和他们的助手们可以看到太阳的黑色圆盘，在圆盘周围是明亮的日冕晕圈，如火焰般燃烧着，再上面则是一片黑暗，一直到暗红色的地平线如同在夜晚一般，像暗黑的日落时光。

太阳周围的星域很清晰(在普林西比岛和索布拉尔拍摄的)，照片显示了总共 13 颗星。这些星——毕星团——包括相对明亮的(4 等)星：金牛座 κ 星和金牛座 υ 星以及 11 颗较暗的星。* 如下图所示。



曝光是精确地按照排练过的计划完成的，用了 16 张底片。科廷哈姆(Cottingham)将每张底片交给爱丁顿并操作转动系统。爱丁顿则更换滤光板。

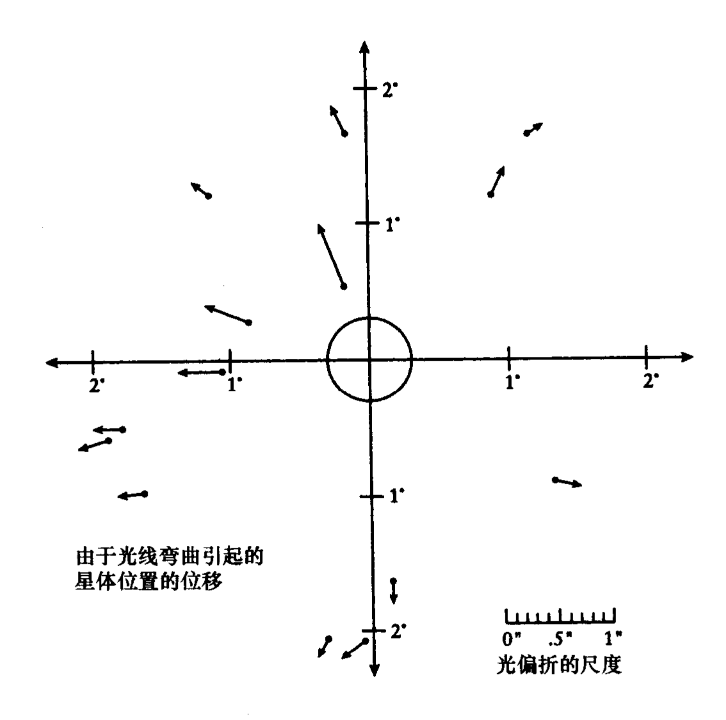
---

* 由于它们在历史上的发现次序不规则，星等随着数字减小而增加，向下有负星等。最亮的星，天狼星，大约是 -1 等，下一等的亮星，织女星，是 0 等星。较暗的星属于 1，2 等星等。4 等星裸眼就很难看到，但是，即使用差一点的望远镜也可以很清楚地观察到。

与此同时，在大西洋另一边的索布拉尔，另一个小组在那里则很高兴有极高的能见度，没有云层，也没有那种对天气焦心的担忧。天文学家们和当地的旁观者凝视着这个蔚为壮观的景象，许多当地人对这个他们以前从未见过的事件感到畏惧。在这里拍摄了相同的星体的照片，但是没有当场冲洗。这些底片被船运回英国，在普林西比岛小组冲洗出他们的照片之后很久才到达英国。因而，索布拉尔小组的工作只能用做为对阿瑟·爱丁顿和他的小组的结果的佐证。

当爱丁顿和他的同事们在普林西比岛冲洗照片时，他们发了慌——最初10张照相底片上竟然一颗星也没有。由于处于对这件令人惊叹的事的兴奋之中，并且这种兴奋还因假如结果是肯定的话它将具有的历史性意义而益发强烈，科学家们在日全食的黑暗之中竟全然没有注意到薄薄的云层有不少时间遮没着太阳和月亮的重叠部分。所拍的其余6张照片中有2张每张显示了5颗星，这刚好能获得结果。用来比较星体位置的检验底片在这次远征之前的几个月之前已经在牛津拍摄好，它们显示了包括毕星团和金牛座中别的星体的同一星域。为了核查系统可能的光学误差，像在索布拉尔也做的那样，小组也拍摄了另一部分天空的检验底片，包括明亮的做标志的大角星(牧夫座 α 星)。

在望远镜旁边他的临时的实验室里，兴奋的爱丁顿冲洗了在牛津和普林西比岛摄的毕星团星域的底片并做了比较。结果是令人吃惊的：1.6弧秒的平均位移，标准误差为±0.3弧秒。在统计学允许的差异范围中，这结果非常好地与爱因斯坦的广义相对论的预言(偏折1.75弧秒)匹配。他迅速地拍发电报到英国："通过云层，充满希望。爱丁顿。"



从他 6 个星期后回到英国后所写的散文和诗中描述这次事件时使用的语句中(以及后来在他书中的回忆中)，* 我们可以了解些爱丁顿真实的兴奋状态：

> 我们的玻璃盖匣占去了我们全部的注意力。天空中出现了不可思议的奇观，就像后来照片显示的那样，奇妙的日珥火焰高悬于太阳表面上方 10 万英里的高空，我们感觉到的只有那朦胧的景象和宇宙的静寂，这种静寂不时被观测者的喊声打破，还有那滴答滴答响彻了整整 302 秒的节拍声。

---

* Sir Arthur Eddington, *Space, Time and Gravitation: An Outline of the General Relativity Theory*, New York: Harper & Row, 1920, 1959 年重印本，第 115 页。

爱丁顿和他的小组停止了他们的活动并开始收拾行李准备返回英国。他们曾计划多呆一些时候以更全面地分析照片，但他们的接待人员转达给他们一个坏消息：轮船公司的罢工迫在眉睫。如果他们不想继续在这个岛上闲荡许多个月的话，他们最好是马上离开。海岛当局出面进行了干预，葡萄牙政府紧急指示为爱丁顿和他的小组强征了住舱登上一艘拥挤的轮船驶往里斯本。船于6月12日匆忙地离开普林西比岛，正好赶在罢工开始之前。7月14日小组抵达利物浦港。

在索布拉尔，为了取得好的参照照片，小组又多呆了7个星期。7月18日，小组开始拆卸他们的仪器并收拾行李，他们要比普林西比岛小组从容不迫得多。他们在7月22日离开索布拉尔，将捆扎好的行李留给当地的接待人员送往英国。他们在几星期后到达英国。索布拉尔小组的计算结果显示了1.98弧秒的平均偏折，标准误差为0.12弧秒。这些结果也在统计学允许的差异范围内确认了爱因斯坦的预言。*

在他们出发去普林西比岛之前，皇家天文学家戴森曾向爱丁顿的助手科廷哈姆解释这次实验的主要想法和它的重大意义，与爱丁顿不同，科廷哈姆不是相对论的专家。科廷哈姆得到的印象是，结果越大就越激动人心，除非明显地差得太离谱——远在爱因斯坦理论所预期的偏折量之上。他问道，“如果偏折是那个量的两倍，那么会发生什么事呢?”“在这种情形下，”戴森回答说，“爱丁顿会发疯，你就只能一个人回家。”

但是，一切完成得比乐观的爱丁顿所期望的还要好。爱因斯坦

---

* 假设通常的统计上的双标准差规则的显著性为95%。

的预言在容许的实验误差范围内得到了证实，所有的人都回家了。可是爱因斯坦本人怎样了呢？毕竟这是他的理论。他何时才能获知这个令人激动的消息呢？

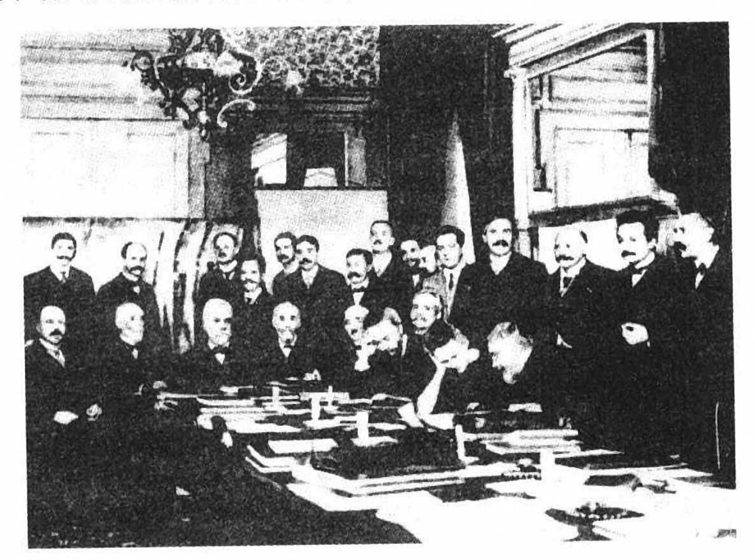
第十章　联合会议

“您在《法兰克福报》上出色的文章给我极大的愉悦。但是现在您，还有我，将会被新闻报道和别的一些家伙困扰，虽然您受到的困扰会少些。但是对我来说，情形则是如此的糟糕，以致我几乎不能外出，更不用说正常工作。”

——阿尔贝特·爱因斯坦 1919 年 2 月 9 日
致物理学家马克斯·玻恩(Max Born)的信 *

1919 年 6 月，爱因斯坦结束他在苏黎世的工作回到柏林。爱因斯坦模模糊糊地知道在 5 月份英国人曾试图在日食期间去证实他的广义相对论的预言。但是爱因斯坦尚未被告知这些远征已经按计划进行，结果已经得到并且这些结果肯定了他的理论。尽管他花了如此多的时间和精力研究不是他主要兴趣的一些领域——实用天文学、气象学以及别的一些与日食期间观测星体有关的领域，并且他还去巴结

弗罗因德利希和别的天文学家，这一切都出于极度渴望证明他的理论——但是却根本没人告知他这件事。在此期间，爱因斯坦已经确认英国——一个敌对国家的一些科学家手头有他的研究成果。这些科学家，在已经和平并且信息可以跨边界自由传递的时期，却从不让他知道他的理论已经被证实。事实上，这些英国人从未让这个消息为相对论之父得知。只是后来，直到 1919 年的 9 月，他在绝望之中向他在荷兰的朋友洛伦兹询问之后，爱因斯坦才得到这个二手消息：爱丁顿和他的实验人员已经证明他是正确的。



索尔维物理学会议/大都会旅馆

爱因斯坦在荷兰有三个好朋友：洛伦兹、德西特和埃伦费斯特，埃伦费斯特比与爱因斯坦年龄相仿的其余两位年轻得多。早在 1911 年，在比利时的索尔维会议上，当时有许多卓越的科学家出席这个大会讨论爱因斯坦的相对论，洛伦兹就计划说服爱因斯坦接受荷兰的莱顿大学的职

---

* Max Born, *The Born-Einstein Letters*, New York: Walker, 1971, p.18.

位，这样爱因斯坦就能经常与他的三位朋友和他的理论的追随者们密切交往。爱因斯坦拒绝了洛伦兹提供的职位，替而代之选择了去柏林，在那里有着他认为地位更高的像普朗克这样的物理学家。

毫无疑问，爱因斯坦对拒绝他的朋友的好意感到遗憾，这位朋友在后来的岁月中就像德西特和埃伦费斯特一样继续研究爱因斯坦的相对论。整个10年中，洛伦兹、埃伦费斯特和德西特继续着他们的研究——力图在爱因斯坦修正和改进他的方程时跟上他的步伐。爱因斯坦是这样来描述他的奋斗的："……我思维中的错误导致我此前干了两年的艰苦工作，终于在1915年，我认识到它们是错的，并且后悔地回到了黎曼曲率，它使我得以发现与天文学中依据经验得知的那些事实的关系。" *

讨论爱因斯坦的正在发展中的理论的信件在埃伦费斯特、洛伦兹和德西特之间往返。人们感到纳闷：如果爱因斯坦曾决定去莱顿而不是柏林，他是否会成功得更好和更早些。至少关于宇宙学方面，如果他在回到高高在上的柏林之后能与德西特的交往比与普朗克的交往更多些，那么爱因斯坦会做得好得多。不管怎样，现在，在1919年，正是66岁的洛伦兹首先带给他关于爱丁顿的成功的消息。爱因斯坦因喜悦而陶醉。9月27日，刚得到这个消息的爱因斯坦写信给他的母亲："亲爱的妈妈！今天来了好消息。H·A·洛伦兹拍电报给我，告知英国人的远征真的证实了光线在太阳附近的偏折。"

回到英国后，这些英国人就抓紧行使对广义相对论的权利而丝毫不理睬爱因斯坦。现在这全成了他们的东西：他们的科学家，他们

---

* Einstein, Albert, *The Origins of the General Theory of Relativity*, Glasgow, U. K.: Jackson, Wylie, 1933.

的远征，是这些造就了广义相对论。现在是向世界宣布这些发现，讨论所得的成果，并对它们展开辩论的时候了，似乎它们是一件有待在议院中处理的政治大事。1919年11月，一次历史性的皇家天文学会和皇家学会的联合会议在伦敦举行。在这里，人们对于广义相对论的赞成意见和反对意见，以及5月份两个远征结果的阐述做了讨论、仔细分析和补充，但是爱因斯坦本人没有出席。就我们所知，他甚至没有被邀请参加。令人啼笑皆非的是，这次伦敦会议却将爱因斯坦推上了作为20世纪最伟大的物理学家的国际著名人士的重要地位。就是这些事件将他从一个物理学家变成为一个不仅在科学方面，而且也在世界事务中活跃的受尊敬的人物。

1919年11月6日，英国功绩勋章获得者，英国皇家学会会长约瑟夫·汤姆孙(Joseph Thomson)爵士宣布开会。接着他请皇家天文学家给会议做题为“最近5月的日食远征的目的和结果的报告”的演讲。弗兰克·戴森爵士作为代表，在长篇陈述中解释了想法是怎样开始的和远征是如何组织的，然后总结了获得的结果，之后他继续说：“所预言的光线的引力弯曲的效果是将星体抛离太阳。在测量照片上星体的位置以检测这个位移时，关于照片的尺度问题立刻遇到困难。尺度的决定很大程度上依赖于底片上外圈的星体，另一方面，爱因斯坦效应在太阳近处内圈的星体上会引起它最大的差异。因此，区分这两种影响星体位置的原因是完全可能的。”*

在皇家天文学会的漫长的演说之后——这篇演说包含了在索布拉尔和普林西比岛两地观测到的所测星体位置的移动的所有细节——轮

---

* “Joint Eclipse Meeting of the Royal Society and the Royal Astronomical Society,” *The Observatory*: *A Monthly Review of Astronomy*, Vol. XLII, No. 545, November, 1919, p.389.

到克罗姆林做报告了，他是去索布拉尔的小组的领导人。一开始，他说他对那位皇家天文学家已经讲的没什么太多的要补充，只是要向巴西政府感谢他们对小组的各方面的帮助，这中间他提到了每一位曾以某种方式帮助过他们的巴西官员的名字。他向全体船员、翻译人员、气象学家、工人和代表表示感谢。接着爱丁顿讲话，他的讲话中毫无那些乏味的细节和无意义的炫耀，爱丁顿可能是那里惟一的一个对广义相对论有着清晰透彻了解的人，他使与会人员享受到了对事件要点的全面了解。

在简短地、有点敷衍了事地描述了事件的时间和经过后，爱丁顿继续讨论刚被远征证明的空间的弯曲。他说，结果清楚地指向两种可能的光线偏折中大的一个——爱因斯坦预言的偏折而不是被认为是从牛顿定律推导出来的那个。他继续说："对光线弯曲的最简单的解释是将它看成光的重量效应。我们知道在光束的路径上光携有动量。起作用的引力则在与光的路径方向不同的方向上产生动量，于是就导致光弯曲。"为了进一步解释由牛顿定律产生的光的弯曲和完美地观察到的由爱因斯坦理论所预言的有两倍大的弯曲之间的差别，爱丁顿竟然继续写了空间的两个几何度量。省略时间方向只集中于空间，那么在这两个理论的每一个中距离元素由下面的度量给出：

牛顿定律：$ds^2=-dr^2-r^2d\Theta^2$*

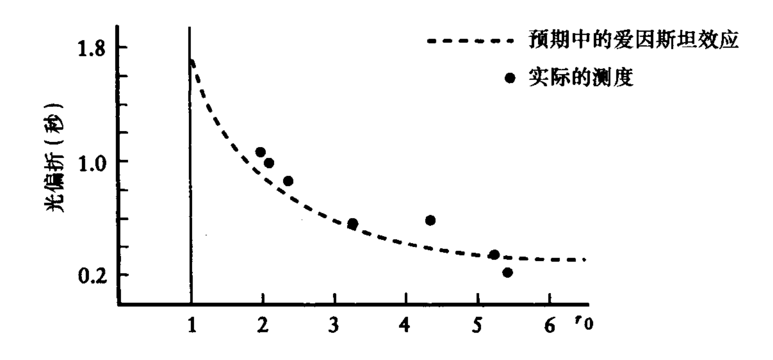
爱因斯坦定律：$ds^2=-(1-2m/r)dr^2-r^2d\Theta^2$。

增添的项$(1-2m/r)$正是这两个距离测度的区别，其中 m 是粒子的质

* 原书牛顿定律有误。——译者

量，r 和 Θ 是空间的极坐标。爱因斯坦距离是对大质量物体太阳周围的空间的弯曲——它的非欧几里得性质的真实测度。在 12 月举行的皇家天文学会的另一次会议上，爱丁顿用下面的话提到有关空间和它的弯曲这个事实："要使这些结果和欧几里得几何学相符合存在着困难，但这意味着我们必须选择行得通的某种几何法则。" *

会议变成两种观点之间的激烈对抗：爱丁顿—戴森的观点认为广义相对论已经被证明，至少在它预言光的弯曲恰恰达到爱因斯坦阐明的程度方面已被证明，另一种则是主要由奥利弗·洛奇(Oliver Lodge)爵士坚持的相反的观点。后者本来就曾打赌两个小组不会获得现在的结果。他是一个顽固的旧理论信徒，固执地坚持以太神话和别的一些现在被广义相对论推翻的物理学理论。另一个抱怀疑态度的是路德维格·西尔伯斯坦(Ludwig Silberstein)，他争辩说，爱因斯坦的理论没有被证明，因为引力红移效应尚未被发现。然而，爱丁顿耐心地解释说，现在的结果的影响是全面的，红移则是另一回事，需要另一个实验。



最后，很清楚爱丁顿—戴森的观点获胜。空间是弯曲的，广义相对论得到支持。皇家学会会长 J·J·汤姆孙爵士在这个历史性会

* "Meeting of the Royal Astronomical Society, Friday, 1919 December 12," *The Observatory: A Monthly Review of Astronomy*, Vol. XLIII, No. 548, January, 1920, p.35.

议结束时他的致辞中总结了大多数人的意见：“这是自牛顿时代以来获得的和引力理论相联系的最重要的结果，在和他有着如此密切关系的学会会议上宣布这一结果是合适的。如果爱因斯坦的推理完全成立这一点得到确认——更何况它已经通过了两次非常严格的与水星近日点和现在的日食有关的测试——那么它是人类思想的最高成就之一。这个理论的一个弱点是表达它时所遇到的巨大困难。”已故的著名天体物理学家S·昌德拉塞卡在回忆J·J·汤姆孙视为“困难”的东西时说，很明显，在会议期间开始形成这样一个信念：广义相对论是如此难于解释清楚以致世界上没有几个人有能力理解它。昌德拉塞卡讲了下面的故事。

在会后举行的宴会上，路德维格·西尔伯斯坦走近爱丁顿并说：“爱丁顿教授，你想必是世界上三个懂广义相对论的人中的一个了。”在爱丁顿迟疑之际，西尔伯斯坦催促道：“不要谦虚啦，爱丁顿，”而爱丁顿回答说：“恰恰相反，我正在拼命想谁是那第三个人。”*

在皇家天文学会的招待宴会上，爱丁顿朗读了他为了纪念这次日食远征的巨大成功而写的仿鲁拜体的四行诗。

时钟无疑有快慢之分，

但只要稳定地以不变的速率走着就行。

瞧！云层正在分开，又见太阳。

天幕上展现月牙形微光——它出现了！——

它出现了！

---

* S. Chandrasekhar, *Eddington: The Most Distinguished Astrophysicist of His Time*, New York: Cambridge University Press, 1957, p.30.

五分钟，不可浪费的瞬间，
五分钟，留给追迹的照片——
星星正在闪耀，星之光从黑暗的
球中涌出——赶快！

里里外外，上下左右，
有的只是影子的魔术表演，
在暗盒中嬉戏着，太阳权作烛光，
在暗盒子周围我们则像幽灵般来来往往。

喏，让智者去核对我们的测量吧，
至少一件事是肯定的，光有重量，
其余的可以争议，一件事则是肯定的——
光线，当接近太阳时，不再笔直前进。

会议引起英国媒体的充分注意，隔天，11月7日，消息传开了。伦敦《泰晤士报》的大字标题宣布："科学的革命——新宇宙理论——牛顿的想法被推翻——空间'被扭曲'。"稍后《纽约时报》也做了报道，接着是全世界的报刊和杂志纷纷报道。在几天之内，爱因斯坦成了全世界都知道的最伟大的著名人物之一——可能是最最伟大的著名人物。

* * * *

以后几年里还进行过几次别的日食远征，所有的观测都确认了

1919 年爱丁顿—戴森杰作的结果。紧接着的 1922 年的日食远征得到了支持爱因斯坦理论的非常好的结果，每次报道的日食远征都如此——只有一次例外。在 1932 年 1 月皇家天文学会的会议上，埃尔温·弗罗因德利希——当时是苏格兰的天文学家——给出了他的日食远征的结果。他声称他探测到的光线偏折大大地超过了爱因斯坦的预言。* 难怪爱因斯坦和弗罗因德利希之间延续了 20 多年的通信会突然地在 1932 年终止。爱因斯坦本人陷入反驳他往昔的朋友的错误结论为自己的理论辩护这种窘境。1932 年 4 月 23 日在卡珀斯他的乡下住处写给格蒙登地方的 L·迈尔(可能是一位从媒体中得悉弗罗因德利希结果的非专业人士)的一封信中，爱因斯坦说了下面的话。** "弗罗因德利希先生的结果(如利克天文台的特吕姆普勒先生在一篇尚未发表的论文中清楚地证明的那样)是根据对实验结果所作的错误计算而得到的。如果计算正确的话，将会和理论结果十分一致。"

显然，弗罗因德利希所报道的结果并未得到重视。在 1923 年 4 月的皇家天文学会的会议上，在得知 1922 年日食的肯定性结果后，感到满意的爱丁顿对广义相对论和太阳附近光线的弯曲做了断言："我想这是《捕鲨》中的撞钟人他定下的规矩：'当我将此事说三遍时，这件事就是对的。'现在星星们已经对三次不同的远征将它说了三遍，因此我相信它们的答案是对的。"

现在很清楚，在大质量物体附近，空间是非欧几里得的——它是弯曲的。接着产生的问题是：整个宇宙的形状是怎样的？这里不是

---

* S. Chandrasekhar, *Eddington: The Most Distinguished Astrophysicist of His Time*, New York: Cambridge University Press, 1957, p.30.

** Michael Gruning, *A House for Albert Einstein*, 德文重印本, Berlin: Verlag der Nation, 1990, pp.388—389。

只指在大质量物体例如一个星球的局部近旁的空间。对这个问题，又是爱因斯坦走在人们之前。出于相信他的理论是正确的并且空间是非欧几里得的，爱因斯坦在 1919 年日食这件大事之前两年就已经开始思考整个宇宙的形状和演变。他的研究将带给他一生中最有争议的假设。1917 年，正当他处理他的场方程时，爱因斯坦不知不觉地打开了潘多拉的盒子*。

* 即希腊神话中传说的内装各种灾难和祸患的盒子。——译者

第十一章　对宇宙学的思考

“我常常奇怪爱因斯坦怎么能使他自己作出如此简单的一个假设……宇宙如此简单以至我们可以用一个一维微分方程来分析它——一切只是一个只与时间有关的函数。当然，爱因斯坦的直觉是非凡的，他肯定非常接近真相——那就是宇宙的本来面貌。”

——詹姆斯·皮布尔斯(James Peebles)，

普林斯顿宇宙学家，1990年*

1917年2月，阿尔贝特·爱因斯坦向普鲁士科学院呈交了一篇标志现代宇宙学诞生的论文。在这篇论文中，爱因斯坦充分运用了他新近完成的广义相对论来表述有关宇宙整体的问题。论文的标题是“根据广义相对论对宇宙学的思考”。研究者们认为爱因斯坦之所以将他的思考涉及至整个宇宙是由于恩斯特·马赫** 思想的影响。

马赫认为，地球上观察到的惯性力是因为将整个固定的恒星系作

为参照系而引起的。这被称为马赫惯性定律。它说，一个质点的全部惯性是由于宇宙中所有其他的质量的存在而产生的一种效应。为了弄清楚马赫的惯性定律，可以考察傅科摆***。许多科学博物馆和别的一些公共场所都有这种摆，它从很高的天花板悬挂下来并在地面上一个大的圆周上方规则地摆动。它的原理是让·傅科(Jean Foucault，1819—1868)****发现的。

当摆在一天内来回摆动过许多小时后，你会清楚地觉察到经这段时间后摆动角的移动。这里发生的事情是，摆保持得很准确的不是与地球的相对位置，相反却是它自己固定的摆动方向；而地球由于它的自转，正在摆的下面改变它的倾斜。马赫认为，傅科摆对于宇宙中不动的恒星保持着它的惯性，而与地球无关。

爱因斯坦的论文首先对过去的一个方程问题做新的分析，这个方程归属于牛顿和法国数学家西梅翁-德尼·泊松(Siméon-Denis Poisson，1781—1840)。牛顿得到的结论是，不可能存在有限宇宙。早在17世纪90年代，牛顿就知道由于引力将每一个大质量物体拉向所有的其他的大质量物体，因此一个静态的有限的宇宙是不可能存在的。为什么？要了解这一点的一种方法是利用物理中的一个事实：质量可以被视为是通过它的中心——质心在起作用的。如果你想象有限空间中一个非常巨大的充满着星系和恒星以及银河际物质的球面，你可以认为力集中在球面中所有质量的质心处。在这样的一个

---

* 参见 A. Lightman and R. Brawer, *Origins: The Lives and Worlds of Modern Cosmologists*, Cambridge, MA: Harvard University Press, 1990.

** 参见例如：Max Born, *Einstein's Theory of Relativity*, New York: Dover, 1965, p.362.

*** 即一种演示地球绕轴自转的仪器。——译者

**** 让·傅科，法国物理学家，拍摄第一张太阳照片(1845)，用旋转镜测定光速，用傅科摆演示地球绕轴自转(1851)，并制成棱镜，陀螺仪等。——译者

静止的、有限的宇宙中，所有物质将被拉向质心，结果宇宙中所有的物体产生向内的速度，最终，一切就坍缩到那个质心。

当时牛顿辩解说，如果宇宙有无限多个恒星，分布于无限空间之中，这样的事就不会发生，因为将不存在一切都落入那里的引力中心。然而，这种说法是有缺陷的，因为在一个无限的宇宙中每一处都可以作为宇宙的中心，这是因为从各个方向看出去都有无限多个恒星。后来发现，一种数学上的极限论证是解决这个问题的方法：先假设一个有限的宇宙，然后在所有的径向上添加恒星以至无穷。在研究这种论证时，一件事变得清楚了，就是即使只是一个无限的宇宙——如果是静态的并且引力是惟一的远距作用力——其本身最终也将坍缩。

然而，在他的论文中，爱因斯坦首先讨论了牛顿的引力思想并叙述了泊松方程，这是一个将物质的分布与引力场 ϕ 的变化联系起来的微分方程。爱因斯坦注意到在空间方向的无穷远处，引力场 ϕ 趋向于某个固定的有限数。他解释说，如果我们想将宇宙看做在空间的延伸上是无限的话，那么对他的广义相对论方程必须加上某种极限条件。于是，爱因斯坦论证说，为使引力场在无穷远处有一个极限值，要加在方程上的正确条件是：宇宙中物质的平均密度，用 ρ 表示，必须比 $1/r^2$ 还要快地衰减到零，这里 r 是从这个球形宇宙的中心向外指向无穷远处的距离。爱因斯坦说，这个条件对宇宙加上了某种形式的有限性，虽然总质量仍可以是无限的。*

爱因斯坦继续考虑他正在为宇宙构造的模型，将牛顿和泊松的引

---

* Albert Einstein, "Cosmological Considerations on the General Theory of Relativity," 重印于 Albert Einstein, *The Principle of Relativity*, New York: Dover, 1923, p.178。

力场在爱因斯坦引力场方程中用黎曼度量张量 $g_{\mu\nu}$ 替代，牛顿—泊松的物质密度 ρ 则用爱因斯坦的能量—动量张量 $T_{\mu\nu}$* 替代。这些张量型的量是下述引力场方程的基本成分：

$$R_{\mu\nu} - 1/2\, g_{\mu\nu} R = -\kappa T_{\mu\nu}$$

(这里 $\kappa = 8\pi G$，这样可使方程更紧凑地写成上述形式)，它是爱因斯坦两年前推导出的广义相对论的决定性的成果。

他所想的问题是，如何在他的张量值的引力场方程中连贯地推广牛顿—泊松关系，使得广义相对论能以一种有意义的方式应用于整个巨大的宇宙，而不是只适用于一颗恒星或星系的局部领域。

依照他列出的关于物质的平均密度应该比宇宙半径平方的倒数(即 $1/r^2$)还要快地衰减到零的假定，爱因斯坦认识到，他的方程将必须满足一个有趣的条件：天体发射的辐射将有一部分脱离宇宙的牛顿体系，从宇宙中逃逸，消失于浩瀚的无穷远处。引力场在空间的无穷远处必须成为常数这个事实告诉爱因斯坦：光将同样地会脱离宇宙继续向外奔向无穷远处，像恒星这样的大质量物体也可能会这样。因此恒星能够克服牛顿引力并“到达无穷远处”。他写道：“根据统计力学，这种情形必定会不时地出现，只要星系的全部能量——若集中到单个星球——大得足以将那个星球送上去无穷远处的旅程，一旦如此，它就永远无法返回。”**

由于这个原因，爱因斯坦作出了一个使人震惊的结论：宇宙本身

---

* 注意根据爱因斯坦著名的公式 $E=mc^2$，能量和质量是等价的。

** Albert Einstein, “Cosmological Considerations on the General Theory of Relativity,” 重印于 Albert Einstein, *The Principle of Relativity*, New York: Dover, 1923, p.178。

必定是在膨胀着的——恒星、物质和辐射这一切都必定正在向外飞向“无穷远”，不这样，整个宇宙本身就将坍缩，不管它是否有有限多个恒星和有限数量的物质。* 就这样，爱因斯坦根据他自己的场方程发现了宇宙的膨胀。但是，他不相信自己的结论。在他的论文中，他重申观测到的恒星的速度相当小(也就是说，不会看到向无穷远处飞离的恒星，因为否则它们的速度须是比较高的)。他写道：“我们可以尝试通过假设极限位势在无穷远处有非常高的值来避免这个特殊的困难。如果引力位势的值本身并不一定受到天体的制约，这将是一种可能的解决办法，事实是，我们不得不认为，引力场位势出现的任何大差别是与已知事实矛盾的。因此这种差别的大小必须确实是非常的小以致由它们引起的星系速度不会超过实际观测到的速度。”** 要是爱因斯坦当时知道我们今天知道的事实那有多好：我们已经观测到的最远的星系正在以超过光速的 95% 的速度远离我们(向无穷远处)而去。

但是，爱因斯坦并不知道这些事实。在他的宇宙中只有一个星系——银河系。甚至仙女座——离我们 220 万光年远的邻居在 1917 年也还没有被认定为是另一个星系。它被当做是停留在我们自己的星系(宇宙)中的星云——由气体和尘埃组成的一片模糊状的天空。而在银河中，星星的运动并不很快。因此，爱因斯坦就按照他认为是

---

* 应用于我们宇宙所在的空间的无穷远的概念可以这样来理解。想象一个在各个方向延伸至目力所及那么远处的平面。现在在地平线上，平面在你看到的每个方向上向上弯曲并且不断地升起，倾斜度不断增大。一直向上，在极限时，在你四周向上弯曲起来的一切在你头顶上非常远的那个点——无穷远点处连接起来。(这个数学模型称为“平面的一点紧密化”。)如果你认为你所在的空间是三维的而不是二维的，或甚至是表明空间和时间的四维空间，上面的模型就可充做一个无限空间的宇宙。

** Albert Einstein, “Cosmological Considerations on the General Theory of Relativity,”重印于 Albert Einstein, *The Principle of Relativity*, New York: Dover, 1923, p.178。

对的去做——他否定了他的理论告诉他的结论，并且设法修改理论使它适合他看到的现实：一个静态的无论怎样都不会向内坍缩到其中心的宇宙。

爱因斯坦评论说，还有一个人已经想到过将广义相对论应用于宇宙学中的问题，但是，他却选择了一种等于是放弃的态度，这个人就是德西特，他在 1916 年 11 月由阿姆斯特丹科学院出版的一篇论文中谈到过这些问题。然而，爱因斯坦继续说："我必须承认，要我像这样完全放弃这个基本问题是一件困难的事。在为取得满意的结论所作的种种努力都被证明是徒劳的之前，我不会下决心放弃。"

爱因斯坦的引力场方程在数学上是很完美的，这就是为什么即使在取得广义相对论的实验证据之前爱因斯坦就坚持相信他的方程是正确的原因，这也就是为什么他后来说，假如实验失败，他将感到"为老天爷惋惜"的原因，因为"理论是正确的"。这样一来，所面临的使似乎是静态的宇宙与隐含着宇宙是膨胀着的漂亮的方程相一致这个显而易见的问题成了严重的精神负担。但是，如爱因斯坦所说，他必须尝试使现实与他的方程能取得一致，直到一切努力都被证明是徒劳时为止。并且他也这样做了。爱因斯坦改变了他的完美的方程，这个方程曾使他和物理学如此出色地描述了自然现象。方程

$$R_{\mu\nu}-1/2\, g_{\mu\nu}R=-\kappa T_{\mu\nu}$$

被改变成：

$$R_{\mu\nu}-1/2\, g_{\mu\nu}R-\lambda g_{\mu\nu}=-\kappa T_{\mu\nu},$$

这里，他添加了一个简单的常数，用希腊字母 λ 表示，去乘他的度量张量 $g_{\mu\nu}$。这是一种非常仔细的修改，其目的在于，保持一个有意

义的方程所必须具有的重要的物理特征。爱因斯坦在方程中所作的更动是希望对诸如行星运动的局部现象几乎没有什么影响，但是对极为遥远的距离却有极大的效果。这是一个天才般的设想——只有爱因斯坦本人才能作出的设想。

爱因斯坦利用了他的空间是非欧几里得的这个事实。爱因斯坦所考虑的空间的曲率是由 10 个量表达的，它们对应于四维时空中的 10 个度量张量的系数 g。爱因斯坦使用一个小量 λ 弱化了他的度量张量中的每一个元素。他所作的只是巧妙地处理了宇宙的几何学使它适合这个方程。项 λ 使他能做到这一点，并在后来被称为宇宙常数。而爱因斯坦永远未能使人们忘记他这个创造，宇宙常数在他的余生将时刻萦绕在他的心头。

爱因斯坦的包含宇宙常数的方程有许多好的性质。他的方程是描述整个宇宙的第一个数学模型。在这一模型中宇宙是静态的——既不膨胀也不收缩。它的外形是球面形的并且有界。它有着常数曲率。牛顿的无限性问题得到了解决，因为宇宙是有限的但是却没有边界。为了明白一个模型怎么会是有限的但却无界，考虑球面这个二维的例子。在这里，大圆是两点之间的最短距离。如果在地球表面沿这样的一条曲线行走，最终在绕过地球一圈后又会回到出发的地方。尽管在地球表面的这种曲线(称为测地线)上没有边界，但是，这个表面是有限的。爱因斯坦的宇宙是地球表面的一种三维模拟。在这里，沿着一条测地线(两点之间的距离最短的曲线)行进的光线或粒子最终将回到它的出发点——然而，这将花去非常长的时间。这样的宇宙是有限的但却无界。爱因斯坦的宇宙具有与时间无关的曲率。这个宇宙是各向同性的，也就是说，它看上去处处都是同样的。它也是迷向的，也就是说，它从观测者可能看到的各个方向上

看去都是同样的——空间中没有特殊的方向。

爱因斯坦的三维球面型宇宙的曲率半径与宇宙常数 λ 有极密切的关系，半径和 λ 两者都依赖于整个宇宙中物质的总量。如果宇宙有许多质量，它的曲率半径就比较小——巨大的球面在包含更多的质量时就弯曲得厉害些。但是当物质膨胀时，空间的弯曲就被削弱。爱因斯坦认为，这些性质是有现实意义的。他也研究了宇宙中质量的密度，也就是说，质量对空间之比：宇宙的全部质量在这空间的整个巨大的球面上是如何分布的?

在爱因斯坦的宇宙中质量的平均密度被假设为在空间中各处都是不变的。爱因斯坦在论证这一点时利用了他的广义相对论的局部结果。“根据广义相对论，”他在他论述宇宙学的文章中写道，“四维时空连续统的度量特征(曲率)在每一点是由在这个点的物质和这些物质的状态来决定的。”由于物质在空间中变化多端，因此，他论证说，空间的度量性质必定是极端复杂的。

但是爱因斯坦提供了一条出路。他说，如果我们关心的是宇宙的大尺度结构，而不是像大质量物体周围的空间高度弯曲这类局部性质的话，那么空间的平均密度应该是恰当的参数。因此，“我们可以对我们自己说，物质在巨大空间中是均匀地分布着的，结果，它的分布密度是一个变量函数，不过变化非常缓慢。”

爱因斯坦引入了宇宙中物质的平均密度——参数 ρ——这个概念。这个物质平均密度的概念直到20世纪末依然是所有宇宙学理论的重要主题。爱因斯坦认为，他已经找到他的宇宙的另一个合意的性质，因为他推导的作为他的方程的一个解的这个模型隐含着当宇宙常数不等于零时，如果质量密度参数 ρ 等于零，则方程将不被满足。于是，他认为在一个不包含物质的宇宙中，这个方程将不

成立。

起初，爱因斯坦方程中引入的宇宙常数似乎完全不足以招惹是非。它是爱因斯坦自己伟大的方程——似乎他有各种权利去改变它，只要他高兴。但是很快就来了第一次挑战。再回到荷兰看看，年老的德西特，长着长而密的白发和山羊胡子，依然在努力地研究宇宙学和广义相对论。他是广义相对论的忠实信徒，和他的朋友埃伦费斯特和洛伦兹一起继续做着为爱因斯坦的广义相对论添砖加瓦的工作。爱因斯坦关于宇宙学的论文发表的同一年，即 1917 年的早些时候，德西特已经发表了他自己的论文，这篇论文使爱因斯坦感到极大的困窘。德西特的论文提出了爱因斯坦的带有宇宙常数的场方程的另一个解。德西特的解允许根本没有物质的宇宙——真空的宇宙。

爱因斯坦感到困窘，因为他在寻求对宇宙的解释时，曾受到马赫思想的影响，马赫认为宇宙的质量分布将确定惯性系(傅科摆的方向变动就是宇宙中总质量施加于其上的合力的结果)。爱因斯坦似乎很相信马赫原理，在他呆在布拉格的那年，他写到过关于质点的总惯性是由所有其余的物质的存在而引起的这个猜测的合理性——这是一个点质量与宇宙中所有其余的质量的一种相互作用。后来在苏黎世，他像以前一样相信这个原理是成立的，甚至写信给马赫说，如果光线的弯曲得以发现，那么它将确认马赫的假设。

但是，当他写他的 1917 年的关于宇宙学的论文时，在涉及马赫假设的那部分时显然不那么热情——因为他写信给他的朋友保罗·埃伦费斯特说，“关于引力我又一次胡诌了一通，这会使我有被关进疯人院去的危险。”在论文发表之前与德西特的一次谈话中，爱因斯坦提到过这种可能性，即惯性完全是因为宇宙中有物质的存在而产生的。但是，尽管爱因斯坦的宇宙学论文已经发表，德西特的解却隐

含着这样的意思：质量对于在宇宙中确定这样的惯性系来说并不是必需的。爱因斯坦方程的德西特解具有另一个非常重要的特点——在德西特的论文出现的那个年代被忽视了的一个特点。德西特解中的宇宙可以完全没有物质而很好地存在。然而，如果宇宙中存在物质——那么这个宇宙不是静态的。

在所有的物质上有某种宇宙斥力在起作用，因为它们彼此间正在飞离。根据方程的解，这种现象本身只能在大距离上出现。于是，精明的德西特开始寻找关于宇宙膨胀的天文学的报道，但是他没有找到任何东西。应该指出，德西特宇宙中的膨胀不是简单的膨胀。它与 1980 年由麻省理工学院的宇宙学家艾伦·古思发展的暴胀宇宙理论是一致的。对爱因斯坦的将这个有点儿麻烦的宇宙常数结合进去的理论，更大的打击正在来临。

尽管爱因斯坦本身从未这样说过，但是他无疑相信正确的宇宙场方程不应该有不包含物质的解。一个真空的宇宙除了违背马赫关于惯性系的思想外，还有许多理由使它不为人们喜欢。爱因斯坦在以后的两年中做了许多努力去寻找爱因斯坦宇宙学方程的德西特解中的错误。但是爱因斯坦失败了。1919 年，他尝试了别的方法。爱因斯坦仍然采用他的带有宇宙常数的方程，并且添加了能量—动量张量 T 来自于电磁学的这个假定。促使他提出这个假定的原因是，他曾假设引力使带电荷粒子聚集起来。

这种处理方法是爱因斯坦试图统一物理学各种理论的首次尝试：在这里他正试图以一种方式将电磁学和引力统一起来。寻求一种统一场论花去爱因斯坦余生中的绝大部分时间，但是，他没有成功地找到一个能描述所有的物理定律的方程。无论如何，在 1917 年以后的岁月中，爱因斯坦不再谈论马赫的惯性思想和宇宙的质量。他对宇

宙常数失去了信任。不久，致命的一击来临了——至少爱因斯坦的观点是这样的。

对宇宙常数的打击来自两位美国天文学家的工作。在爱因斯坦以及德西特的论文发表的当年，即1917年，亚利桑那州弗拉格斯塔夫的洛韦尔天文台的天文学家维斯托·M·斯里弗的论文也发表了。斯里弗用他的望远镜观察旋涡星云。当时这些旋涡星云被认为是银河的一部分。但是斯里弗注意到：除了这些旋涡星云中星星的旋转速度外，还有谱线向光谱的红端的一种均匀的大移动。当使用多普勒效应的计算法将红移转换成速度时，结果是旋涡星云正以非常高的速度退离我们——其中有一些的速度超过每小时200万英里。斯里弗所面临的事实，尽管当时还没认识到，正是宇宙膨胀的证据。他能够说出他正在观测的星云中的绝大多数正在非常快地离开我们(除了我们现在知道的几个以外，它们都是附近的星系)，但是他不知道这些是一个个的星系，也不知道这些星系有多远。然而，这些情形不久就由于埃德温·哈勃的工作变得清晰得多。

为了使哈勃能完成他对我们的宇宙的使人震惊的发现，在哈佛大学天文台的一位天文学家必须发明天文学上突破性的技术。哈佛大学天文台的亨里埃塔·勒维特(Henrietta Leavitt，1868—1921)对在秘鲁的哈佛南方天文台观测到的变星做了分类：勒维特当时正在研究大小麦哲伦云中的变星的光线。大小麦哲伦云是银河中两个伴星系。它们是由麦哲伦船上的水手们在1521年*环球航行期间发现的。在南天极附近的夜空中，它们的形状有如一片模糊发光的云。由于麦哲伦云看上去像一片粘在一起的星云，因此这一片星云中的星星离我们

---

* 原书误为1686年。——译者

的距离(在天文学尺度上)应该大致相等似乎是合理的。

后来表明这是一个好的猜测，因为它使勒维特作出了令人惊愕的发现。她发现了在变星的外观星等和星的周期或者说星等变化的循环之间的一个直接的关系。由于麦哲伦云中的星星离地球的距离大体上相等，可以认为这种外观星等和周期之间的关系在绝对星等(即对于一个标准的预先指定的距离而言的星等)和变化周期之间也是存在的。亨里埃塔·勒维特研究的星星属于特殊的一类：造父变星。它们是由于所发现的第一颗具有非常规则的亮暗周期的星——δ星——位于造父星座中而得名的。

到了1912年，勒维特已经确定了25颗星的星等和周期之间的关系。她继续做她的艰苦工作，将每一颗星的亮度的变化和星的周期做比较，最终发现了存在于这两个变量之间的精确的数学关系。造父变星显得越明亮，它的周期就越长。根据这两个天文学变量之间的这种关系可以确定出到星星的距离——即使是遥远星系中的造父变星。勒维特为天文学提供了我们现在所知的第一个用来确定宇宙距离的“标准烛光”。1998年，索尔·珀尔马特和他的小组报道了他们使用另一类型的标准烛光——Ia型超新星来完成类似的任务：确定非常非常遥远的星系的距离。对于如此远的星系，用造父变星的方法是无能为力的，因为这些星系实在太遥远了，另一方面，威力巨大的超新星爆炸可以通过精确的摄影术和非常高效的望远镜观察到。无论如何，这是哈勃发现宇宙膨胀的第一个坚实的证据的时刻。

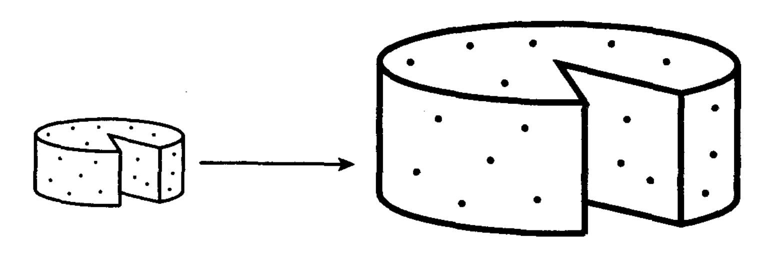
埃德温·哈勃(1889—1953)被认为是20世纪最伟大的天文学家，哈勃太空望远镜就是以他的名字命名的。他于1889年11月20日生于美国密苏里州的马什菲尔德。哈勃在牛津大学学习法律，但是不

久就转向天文学，并且被录取为芝加哥大学的叶凯士天文台的天文学研究生。然后他在战争期间被征调入伍。当他在1919年第一次世界大战结束时，从驻欧洲的美国远征军退役时已经30岁，他加入了在加利福尼亚州的威尔逊山天文台的天文学家队伍。在当时，这个天文台有着世界上最大的望远镜：直径100英寸的胡克反射望远镜。1923年，哈勃开始一个观测计划以搜寻在仙女座星云中的新星。仙女星云是太空中最大的旋涡星云(它也是现在我们所知道的除两个麦哲伦云外最近的星系)。当哈勃更仔细地审视他以为是他在仙女星云中发现的第一颗新星的照片时，他意识到他找到的实际上是一颗造父变星。

当时，在威尔逊山天文台工作的天文学家哈洛·沙普利(Harlow Shapley，1885—1972)已经使用亨里埃塔·勒维特的方法估计了麦哲伦云的距离。因此，当哈勃意识到他在仙女星云中拍摄到的那颗星是一颗造父变星时，他非常兴奋。在研究了这颗星的光曲线后，哈勃已能估计出到仙女星云的距离为90万光年(虽然现在我们知道距离还要远——220万光年)。这个发现足以证明仙女星云是一个单独的星系，不是银河系的一部分。这个发现解决了当时被称为天文学大争论的问题：宇宙岛存在吗？或者说，宇宙是否只由银河系组成，而太空中看到的所有东西都包含在其中？

在证明了存在着完全与银河系独立的星系后，哈勃将巨大的100英寸望远镜瞄准了太空中别的星云区域，试图决定这些星云是否也是独立的星系。在以后几年中，哈勃将全部精力投入到使用100英寸后来是200英寸的望远镜观测星系的工作中，有时是单独一个人，有时是和他的同事米尔顿·赫马森(Milton Humason，1891—1957)一起工作。到了1929年，哈勃已经对20多个星系完成了距离和多普勒红移

的分析。* 在这中间哈勃作出了他伟大的发现：一般来说，星系离我们退行的速度与它们离我们的距离成正比例关系。（红移使他得以计算出退行速度，另一方面距离则利用勒维特的对造父变星的计算法则估计而得。）退行速度与距离之间的直线型关系十分清楚。这条直线的斜率现在称为哈勃常数，这种直线型关系称为哈勃定律。对哈勃定律逻辑上合理的解释只能是整个宇宙正在膨胀，就像一只正在膨松发起的葡萄干蛋糕。



哈勃定律改变了我们对宇宙的看法。静态的模型不再合适。因而，对一个以不变速率膨胀着的宇宙——根据哈勃对相对较近的星系获得的数据似乎是这样的——爱因斯坦方程中的宇宙常数也不再是必要的。1931 年，爱因斯坦在访问了加利福尼亚州并看到了天文学家的计算后，他承认他的方程中的宇宙常数是不适宜的，他正式放弃了它。其实在哈勃关于宇宙膨胀的发现宣布之前，爱因斯坦对他的宇宙常数在纯理论上的依据已经感到失望。他对这个常数的厌恶必定也与根据他带有宇宙常数的方程而作出的另外两个宇宙模型有关。

亚历山大·弗里德曼(Alexander Friedmann，1888—1925)生于圣彼得堡，攻读气象学和数学。在俄罗斯科学院工作时，弗里德曼对于

---

* 绝大部分的星系被发现具有红移——表明它们正在离我们退行。一些相对较近的星系显示有蓝移现象，意味着它们正接近我们。然而，这个现象只是一般规则的一个例外，是由于邻近的星系受到银河系的引力拉动而发生的，或者说，它是在我们的方向上的一种随机运动。

广义相对论发生了兴趣。在研究爱因斯坦方程时，弗里德曼决定放弃静态宇宙的假设，同时保留爱因斯坦的各向同性和速向性的假设。弗里德曼在解方程时认识到这种宇宙不需要宇宙常数。爱因斯坦认为弗里德曼的模型是错的——弗里德曼在他的解中犯了错误——并且写到过这一点。但是，后来爱因斯坦认识到正是他自己在对弗里德曼的解的反驳中犯了错误——并且撤回了他的反驳，声称弗里德曼的工作“使人清醒”。这是由宇宙常数引起的对爱因斯坦的第二次理论上的冲击。接着出现了一位名叫乔治·勒梅特(Georges Lemaître)的比利时牧师和数学家的工作。1927年，勒梅特研究了斯里弗首次观测到的红移并提出了一个膨胀宇宙的数学模型。

1923年，赫尔曼·外尔(Hermann Weyl，1885—1955)* 和爱丁顿研究了德西特宇宙模型中的粒子发生的现象，并发现这些粒子彼此间正在退行。爱因斯坦在给外尔的一封信中谈到这个结果时写道：“如果不存在拟静态的宇宙，那么丢掉那个宇宙常数!”**

---

* 赫尔曼·外尔，德国数学家，移居美国(1933)，入美国籍(1939)，对数学的许多领域均有贡献，对量子力学和相对论贡献尤大，著有《空间、时间、物质》、《群论和量子力学》等。——译者

** 见 Abraham Pais，‘*Subtle is the Lord...*’，New York：Oxford University Press，1982，p.288。

第十二章　空间的膨胀

“宇宙是最终的免费午餐。”

——艾伦·古思

在书名为《宇宙常数问题》的一本研究专著中，诺贝尔奖得主物理学家史蒂文·温伯格(Steven Weinberg)——他是理解广义相对论的爱因斯坦方程的最细微之处的少数几个人中的一个——写道：“不幸的是，干脆地将宇宙常数丢弃并不容易，因为任何对真空的能量密度起影响的因素，其作用就像宇宙常数一样。”* 在引入他的宇宙常数时，爱因斯坦还为科学创造了一种新的数学工具——就连他也无法将它从世界上带走。这个工具在物理学家和宇宙学家解释有关宇宙的理论时是否有用现在成了一个重要的问题。

一个正的宇宙常数可以作为一种斥力，以对抗起吸引作用的引力。当爱因斯坦首次引入他的常数时，他需要某种力将宇宙向外推，这个宇宙根据他创立的场方程原本是要坍缩的。这是爱因斯坦

为了阻止宇宙由于引力而向内落下而强加的人为的一种力。因此，当发现宇宙正在膨胀时，爱因斯坦放弃了宇宙常数。

当亚历山大·弗里德曼去掉爱因斯坦关于静态宇宙的假定后来解爱因斯坦原来的场方程时，得出了宇宙的膨胀，打开了现代宇宙学的新篇章。这就引起勒梅特和其他人询问一个显然的问题：如果宇宙正在膨胀，那么这种膨胀是什么时候开始的？直觉的回答是：在非常遥远的过去的某个时候，宇宙是极为异常地紧聚在一起——因而极其炽热和密集。从这个非常密集的具有物质和能量的小凝团开始，由于迅速的膨胀一下子演化成巨大的宇宙。20世纪40年代后期在英国广播公司(BBC)的一次无线电台谈话节目中，剑桥的宇宙学家弗雷德·霍伊尔(Fred Hoyle)撰用了“大爆炸”这个词来描述这次创造我们的宇宙和它的膨胀的巨大的爆炸。

时空的弯曲随物体质量的增加而增强，因此当整个宇宙被浓缩在一个非常小的范围时，空间的弯曲程度就极高。当整个宇宙被浓缩成一个点时，时间就终止，因为在这个点上——时间的*奇点*——质量密度变成无限，结果时间和空间的方程不再适用。在奇点处无法定义时间。这个想法促使勒梅特将宇宙的开始描述为“没有昨天的一天”。

1965年，牛津大学的罗杰·彭罗塞写了一篇论文，在论文中他使用了拓扑学的思想，描述一个巨大质量的物体怎么会坍缩为一个点——实际上在它自身的重量下被压垮。当发生这种现象时，其结果是形成黑洞。从相对论的观点看，我们对这个过程的最初的了解

---

* Steven Weinberg, *The Cosmological Constant Problem*, Morris Loeb Lectures in Physics, Harvard University, 1988.

来自于卡尔·史瓦西的开创性工作，他是解爱因斯坦场方程的第一人，发现了我们今天所称的星球的史瓦西半径。如果一个星球的真实半径小于(由该星球的质量所决定的)这个数，那么这个星球将坍缩为一点。史瓦西半径是“不归点”——超过黑洞的这个不可见的史瓦西半径而落进黑洞的任何物体或光线将永远消失。彭罗塞证明了就在黑洞的中心处有一个与众不同的点。这个点就是一个时空奇点。在这里，曲率无限，时间不再存在。

根据彭罗塞独创性的论证，这种星球质量的坍缩达到没有任何东西能从它这里逃出的程度。数学上，在这种星球的内部形成一张**陷阱曲面**，并且当不断加速的坍缩继续时就无法使它停止直到最终形成奇点：我们用来认识它们的那些数学和物理都不再适用的点。即使这个星球在外形上与完美的球面对称性有所偏离，仍会发生向奇点的坍缩。* 顺便提一句，早在奇点之前，在史瓦西半径那里，时间就停止了——像一个人从外面观测到的那样。在观测者看来，掉进黑洞的人有如凝结在史瓦西半径的表面上。而掉下去的人将永远不会意识到这种存在状态。**

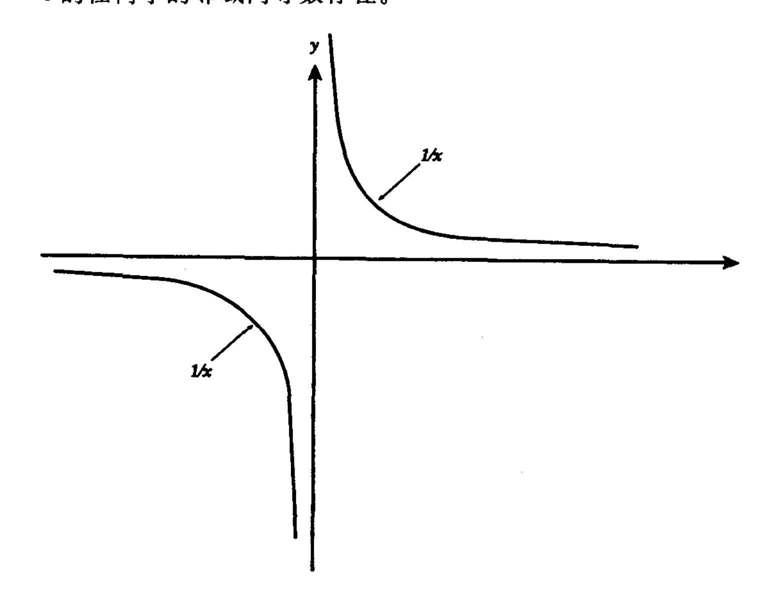
奇点带来的问题是，在我们用来辨认它们的数学或物理范围内我们无法真正地了解它。在数学中，奇点是一个会发生某种病态现象的点。用一个简单的例子来显示奇点的概念。设想一个单变量的函数 $y=f(x)$，这个函数可以是变动良好的：光滑和连续的，并且具有合理定义的导数(函数的即时变化率)。但是，现在设想像 $y=1/x$ 这

---

* Roger Penrose, “Gravitational Collapse and Space-Time Singularities,” *Physical Review Letters*, 18 January, 1965, pp.57—59.

** 有关这个迷人的现象更多的内容请阅读 Leonard Susskind 的有趣的解释文章，“Black Holes and the Information Paradox,” *Scientific American*, April 1997, pp.52—57。

样的函数。当 $x=1$ 时，$y=1$；当 $x=2$ 时，$y=1/2$; 而当 $x=1/2$ 时，$y=2$;当 $x=-2$ 时，$y=-1/2$。但是，当 $x=0$ 时会怎样？在这点上这个函数没有定义。我们剩下的只能是理性的推想。它的值是无穷大吗？但另一方面从逻辑上讲它应该是负无穷大。即使将它定义为无穷大，它的变化率又是什么呢？在这点上导数不再存在——尽管在点 $x=0$ 的任何小的邻域内导数存在。



在黑洞的中心(和在宇宙的起始点)所有的法则无效，就像函数 $y=1/x$ 在 $x=0$ 处出现问题一样。引力变成无限，时空的曲率变成无限并且时间终止。

彭罗塞的论证是反向的，从坍缩到膨胀——这是广义相对论法则容许的。因此，如果我们从一次坍缩开始倒转镜头，我们会明白宇宙起源于人们所称的白洞——时空的一个奇点。由于数学和物理学在奇点处不管用——并且，如果那就是空间和时间开始的时刻，那么我们对于大爆炸之前发生了什么就没有任何答案——因此，关于宇宙

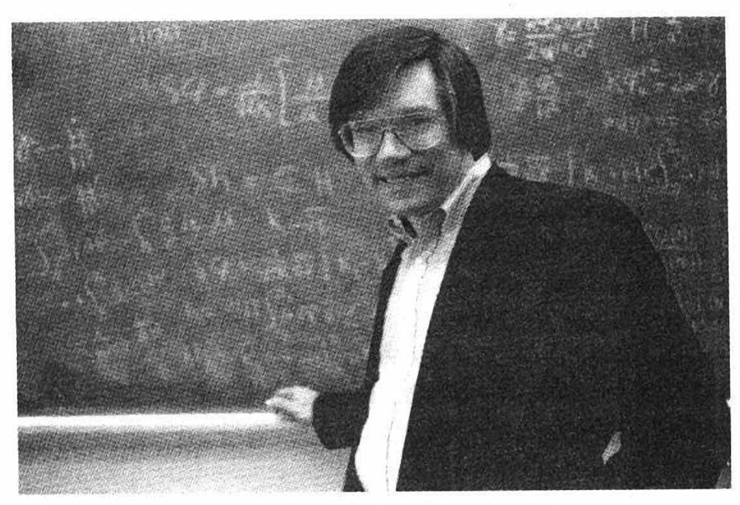
起始的理论经典上都是从大爆炸后极短的若干分之一秒所发生的现象来着手的。其中有两种主要的看法。

标准的大爆炸理论说，在巨大的爆炸之后，空间开始膨胀。过一段时间后产生出重粒子物质：如我们知道的质子、电子和中子，所有这一切都处于一种非常炽热的原生浓汤般的状态，在膨胀时慢慢地开始冷却。由于它非常的稠密，早期的宇宙是不透明的：质子形式的辐射被不断地吸收又重新发射出去。只是当宇宙经历大约30万年之后它才变得足够透明，结果质子能够笔直地穿行。早期宇宙的这种不透明性起着边界的作用。

当我们使用越来越强有力的望远镜观测越来越远的太空深处时，我们也正在时间上看到越来越早的过去。最终我们到达一极限。如果我们的望远镜能真实地看到140亿光年那么远，那么在那个距离上我们会看不到任何东西。根据绝大多数估计，宇宙的年龄大约是120亿到140亿年之间，因此，140亿年接近大爆炸——比30万年更接近大爆炸。但是在30万年时，宇宙是不透明的——因此在这个距离或更远的地方我们不可能看到任何东西。

在大爆炸后10亿年左右，首批恒星和星系开始形成。星系团或巨型星系团不时地涌现。宇宙继续膨胀，最终达到它现在这样的规模。

暴胀宇宙理论是标准的有关宇宙形成的大爆炸理论的另一种说法。艾伦·古思是麻省理工学院的物理学教授，他在1979年创立了很有影响的暴胀宇宙模型。艾伦·古思于1947年生于新泽西州的新不伦瑞克。他在麻省理工学院获得学士学位并于1969年获硕士学位，然后继续在那里攻读物理学的博士学位，1972年获得麻省理工学院的博士学位。接着他在普林斯顿大学担任物理学讲师的职务，并



艾伦·古思
唐娜·科夫尼摄/麻省理工学院

在哥伦比亚大学做研究助手。然后，古思在康奈尔大学做博士后研究粒子物理。1979年秋季，他辞去康奈尔大学的工作到斯坦福线性加速器工作。该年12月份，在斯坦福他产生了一个奇妙的想法。古思的理论试图通过对宇宙学中两个重要的未解问题——平直问题和视界问题——作出解答的方式来解释大爆炸后最初若干分之一秒中发生的事情。

当人们对于宇宙怀有一种特定的信念时就会产生平直问题。这种信念认为宇宙的几何学是“平直的”，或者说是欧几里得的。古思和他的宇宙学的前辈们根据对宇宙中物质密度的估计得到这个结论。他们计算了宇宙的临界密度：如果达到这个密度，宇宙将不会坍缩也不会以相同或更大的速度继续膨胀，相反会减速膨胀，最终速度会趋向于零。这些科学家估计，现在宇宙的密度接近于临界密度(这里接近的意思是临界密度的几分之一到临界密度的2倍)。这些科学家通过向后推算，对宇宙非常年轻的时代所作的外推估计得出了他

们的结论。他们发现宇宙在大爆炸后1秒的时候，它的密度与临界密度直到小数点15位上是相符的。这使他们相信宇宙是惊人地平直的。但是，为什么？标准的大爆炸理论无法解释这个结论。

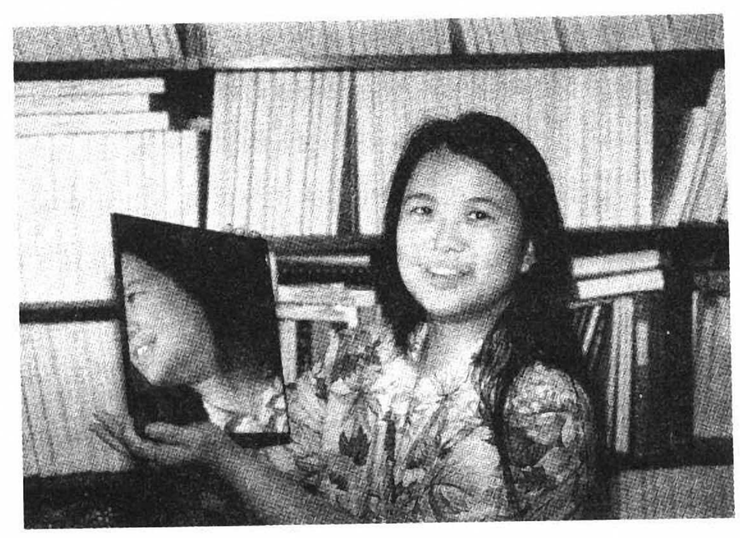
标准的大爆炸理论的第二个问题是视界问题。像在地球上一样，视界是我们能看到的最远的那个点。用相对论的话来说，如果光信号从离我们极远的地方向我们发送，而该地如此之远以致光信号没有时间到达我们这里，那么这个地方必定是在我们的视界之外。

1998年4月，夏威夷大学的埃丝特·胡和她的同事们报道了使用世界上最大的望远镜——两个10米的凯克望远镜之一——看到了最遥远的星系。这个暗淡的星系大约有130亿光年远。宇宙的年龄约是140亿年。现在假设胡或者另一位天文学家朝着相反的方向探视太空并又看到了另一个离我们约130亿光年远的星系。很明显，这两个星系的每一个在另一个的*视界之外*。为什么？因为宇宙的年龄是140亿年，光从这两个星系中的一个走完整个路程到达另一个星系将需要130+130=260亿年，差不多是宇宙年龄的2倍。* 光决不可能到达那里。此外，由于宇宙的膨胀，这两个星系彼此以可与光速相比的速度退行，因此从一个星系发出的光是永远不可能到达另一个星系的。

视界问题由宇宙背景辐射的研究而产生。这种来自于太空的每一个可能的方向的辐射怎么会是如此的各向同性(在十万分之一内)？由于沿着太空中各个方向上的星球一旦处于超越相互的水平时，它们就不可能互相“看见”，它们之间就没有可能交换信息来实现这种各向同性。

---

* 这里及别处，由于空间的不断膨胀，以10亿年为单位的数字稍显不足。



埃丝特·胡

为了解释这个效果，古思提出暴胀理论，这个理论说，在最初的若干分之一秒中，宇宙以非常巨大的指数速率膨胀。古思关于宇宙学的想法借助于粒子物理学家们通晓的一套方法，由此推断早期宇宙中的异常形式的物质会产生一种与引力排斥的力，该排斥力提供了使宇宙膨胀的驱动力。这种被驱动的膨胀维持着太空的各向同性，因而也提供了所期待的对水平问题的解答。同时，也弄明白了这种具有推动力的膨胀正在将宇宙推向临界密度。

暴胀有许多别的细节。爱因斯坦方程中的宇宙常数使暴胀理论更加可信。也许那些碰头讨论关于宇宙的加速膨胀的宇宙学家们因希望保持平直性假设而倾向于宇宙常数，并因此倾向于暴胀理论。

艾伦·古思是由于研究磁单极而开始想到暴胀理论的，不同于普通的磁有两个磁极，磁单极是一种只有一个磁极的粒子，它应该在宇宙中存在，但确实没有发现。他的工作受希格斯场论的影响，后者是粒子物理中的一种理论工具。希格斯场在粒子中还从未被探测

到，但是一些科学家认为它们是性质上破缺对称的原因。古思的暴胀理论认为我们的宇宙是一个更大的超宇宙的一部分，它是由于那个更大的宇宙中的真空波动的结果而生成的。古思也提出还可能存在别的“婴儿宇宙”，孕育于母亲宇宙内别的地点。他甚至暗示超级先进的文明可能有能力在实验室中制造这样的“婴儿宇宙”。

我们怎样知道大爆炸确实发生过呢？如果星系彼此正在退行，那么在过去它们应该是比较接近的。将这个原理一直推广到最初时刻，我们得到一个所有的一切必定曾经聚集在一起的点。但是我们如何知道这一切确实发生过？如果宇宙在大爆炸中开始，并此后不断地膨胀，一直持续到现在我们的时代，那么它必定开始时异常炽热，并必须在膨胀时不断地冷却。20世纪50年代，理论学家乔治·伽莫夫(George Gamow)、拉尔夫·阿尔弗(Ralph Alpher)和罗伯特·赫尔曼(Robert Herman)提议，泄露大爆炸的辐射应该仍然存在于宇宙中。也就是说，由于宇宙从大爆炸的高温中不断冷却，它现在必定达到一定的温度——科学家应该能够测量出的温度。

20世纪60年代，普林斯顿大学的罗伯特·H·迪克(Robert H. Dicke)和詹姆斯·E·皮布尔斯做了类似的预言，并且实际地算出这种辐射，即来自大爆炸的**黑体辐射**的能量。黑体辐射是所有的温度在绝对零度以上的物体发射的一种辐射。任何物体都发射某种能被测知的辐射。这种辐射最明显的例子是热的物体的红外辐射。但是，即使是较低温的物体也有辐射，只是能量水平比较低。

当质子在大爆炸后30万年宇宙变透明时从原生浓汤般状态中释放出来时，它们开始做直线运动，并此后不断地穿越。由于多普勒效应，这些质子一直在失去能量，它们现在的能量水平，因而它们的波长在理论上可以计算出来。

1965年，两位在贝尔实验室工作的天文学家发现了恰好是理论学家们曾经预言的那些东西，但是他们并不知道这种预言。这两个人——阿尔诺·彭齐亚斯(Arno Penzias)和罗伯特·威尔逊(Robert Wilson)——后来由于发现这种微波背景辐射而获得诺贝尔奖。1989年，美国国家航空和航天局发射了宇宙背景探测卫星(COBE)以更精确地测量这种辐射。对太空的所有方向上的辐射的测试结果非常一致，相当于绝对零度以上的2.7度温度(2.7K)。这个发现，与哈勃定律一起，被认为是最重要的宇宙学发现之一，它也支持了大爆炸理论。辐射的一致性被认为是对暴胀宇宙理论的支持。恒星和星系及星系团被认为是在早期宇宙和大爆炸的能量波动中形成的。

我们拥有的对大爆炸理论的另一个证明是宇宙中有关化学元素的相对丰度。科学家们已经计算了根据大爆炸理论预言的化学元素预期的分布规律。大爆炸释放的能量水平隐含着宇宙应该大致含有75%的氢和25%的氦。所有不是这两种元素的别的元素(以及同位素氘、氦-3和锂-7)将只是说明在宇宙中化合物的整个混合状态的演化史迹。这些较重的元素——组成了我们周围的一切事物，包括组成我们自身在内的物质(虽然氢也是我们身体中的主要成分)——是后来由于恒星内部的核反应而生成的。对宇宙中这些元素合成的进一步研究都确认了这个假设。这些研究为大爆炸理论提供了令人信服的证据。

大爆炸开始了宇宙的膨胀。这种膨胀是否像暴胀理论提出的那样以指数速率开始的，这个问题就是：宇宙膨胀的性质是什么？《起源：现代宇宙学家们的生活和世界》*一书对宇宙膨胀给出了最恰当

---

* Alan Lightman and Roberta Brawer, *Origins: The Lives and Worlds of Modern Cosmologists*, Cambridge, MA: Harvard University Press, 1990, p.8.

的模拟。取一条橡皮带，在上面用墨水标出一些点，比方说，每隔1/4英寸画一个点。现在不断地拉伸这条在你两手之间的橡皮带。注意，当你拉伸时，这些点开始离开得远一些了。带上相邻的每两个点(太空中的星系)之间的距离增加了。两个相邻的点现在相距不止1/4英寸。但是不相邻的点又怎样呢？它们被拉伸分离得甚至更快——它们之间的距离以更大的速率增加。如果你将橡皮带足够地拉伸使得原来分离达1/4英寸的两个点现在达到1/2英寸的话，那么由第三个点分隔开的两个点现在足足分离达1英寸。这就是在宇宙的膨胀中发生的情形。

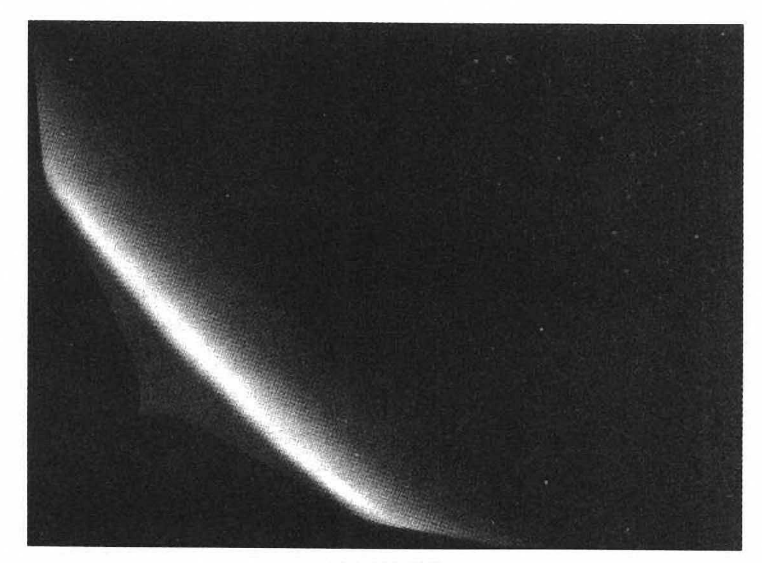
当空间膨胀时，相对接近的星系以比那些离开得更远的星系低的速度彼此分离。任何两个星系分离的速率与它们的距离成正比。这就是哈勃定律。

注意还有另一个非常重要的性质，当你拉伸橡皮带时，每一个点都以完全相同的方式与它的相邻点分离。在橡皮带上不存在特别优越的位置。每个点都可以看做为中心，所有别的点离它退行。宇宙没有明显的中心，也没有任何边缘。即使我们看到每一个星系离我们退行，每个星系却都经历着相同的现象——一种成为膨胀的中心的相同的错觉。

是什么引起膨胀的呢？空间正在被建立，或伸展之中。我们由广义相对论知道空间是塑性的。它是一种有弹性的媒质，它的几何学因引力效应而变化。像我们看到的，空间不是空无所有的。空间像一只正在膨松的蛋糕一样在不断地膨胀。埃丝特·胡和她的同事们发现的星系在以95.6%的光速离我们退行。这正在发生于——对地球上的我们来说——能看到的最遥远的星系。离我们70亿光年的星系似乎在以一半的光速退行。而就更近的星系而言，离我们退行

的速度则更慢些。

为了理解这个奇妙的非直觉能感觉到的现象，最好的办法是承认宇宙是无限的。如果宇宙是无限的，那么任何一点都是它的中心，在任何一点上的观测者会看到星系正在退行，这种退行都有同样的性质，即较近的星系以相对较慢的速度退行，而较远的则以随它们的距离而增加的速度退行。在这个宇宙的葡萄干蛋糕中，每一粒葡萄干“看到”别的葡萄干在以与它们的距离成正比的速度向外扩展。这是对于我们认为是空无所有的空间的一种均匀膨胀的想法。



宇宙的演化

对遥远的超新星的新的观测结果隐含空间不仅在膨胀，而且它正在加速它的膨胀。因此有某种东西正在将空间向外推，它能是什么呢？按照量子物理学，空间，“真空”根本不是一个真空——它充满着能量。虚拟粒子出现了，并且不断地在我们认为是空无所有的空间中出现。在看上去完全空的空间中有着大量的能量，我们不清楚这种能量，也不清楚它们来自何方。真空有如被压缩的急欲爆发的

弹簧。这种由积聚着能量的看不见的弹簧所产生的压力使隐匿于其中的空间膨胀。但是，弹簧以比它引起的膨胀慢得多的速度松开，因此膨胀在加速它的速度。真空的能量，即将空间向外推的力是由爱因斯坦的宇宙常数模拟的。*

---

* 如果我们用 P_v 表示真空的能量，那么爱因斯坦的宇宙常数由 $\lambda = 8\pi G P_v$ 给出。

第十三章　物质的本质

中微子，它们非常小，

既无电荷又无质量，

它们根本不会相互作用，

在它们看来，地球是个傻球，

它们只是穿越而去，

有如落在通风大厅中的尘埃。

——约翰·厄普代克*，1960年

在探求宇宙本质的过程中，科学家面临的最重要的问题之一就是物质的构成问题。什么是物质？宇宙是由物质主宰的，还是存在别的在宇宙的演化及其性质中起重大作用的因素？在广义相对论中，关于物质的问题决定了爱因斯坦的能量—动量张量T的构造。在20世纪的两个重要的物理学理论：广义相对论和量子论的框架中，物质有着不同的性状。广义相对论决定了物质(以及空间和时间)的大尺度

性质，而量子论决定了物质的小尺度性质。前者是一种完全决定性的理论，而量子论在性质上则本质上是概率论的：在量子论中对问题的回答是用概率分布而不是用精确的数字给出的。量子论，除了它别的巨大成功之处，也导致一些前所未知的物质粒子的发现。

当量子论在20世纪早期首次被发现时，物理学家只知道中子、质子和电子。然而发现了一种特殊形式的放射性衰减，在这过程中释放出一个电子和一个质子。通过比较在反应前后系统中存在的能量总量，沃尔夫冈·泡利(Wolfgang Pauli)** 在1930年做了假设：这种反应必定还释放了一种以前不知道的粒子。一年以后，意大利裔的美籍物理学家恩里科·费米(Enrico Fermi)将这种设想中的粒子称为中微子(neutrino)(意大利语的意思为“小的中子”)。中微子被认为在放射性衰减中带走了恰好是失去的那部分能量。

中微子被看做为不带电的粒子，并且在1998年6月以前它也被认为不具有质量。至少在此之前没有测量到中微子的质量。1956年，弗雷德里克·莱因斯(Frederick Reines)和克莱德·考恩(Clyde Cowan)*** 发现了在萨凡纳河的一个核反应器中发射出来的中微子。1995年，在考恩去世之后，莱因斯由于发现了这种在四分之一世纪前被预言过其存在的粒子而获得诺贝尔奖。于是，一种为了说明核反应的最终生成物中神秘地失去的能量而由科学家们“制造”其存在的粒子被真实地找到了。中微子的故事表明理论和数学怎样得以用来

---

* 约翰·厄普代克(John Updike，1932—)，美国作家。擅长写长篇小说、短篇小说和诗歌。——译者

** 沃尔夫冈·泡利(1900—1958)，美籍奥地利物理学家，因发现泡利不相容原理(1925)获1945年诺贝尔物理学奖。——译者

*** 弗雷德里克·莱因斯(1918—)，美国物理学家。克莱德·考恩是与莱因斯合作的同事。——译者

深化人们的认识，也表明优秀的理论学家对他们的理论的信念是会有实验结果给予回报的。 但是中微子的故事还只是刚开始。

在那个时候前后，不断涌现的关于核聚变机制的知识使科学家们深信，正是这种类型的核反应使恒星燃烧。 因此，如果恒星内部的火焰是核聚变，那么恒星，包括我们的太阳必定会发射出中微子，因为核聚变释放出巨大的能量。 科学家们相信这种极微小的粒子，既不带电又没有质量或者接近于没有质量，正在不断地从太阳到达地球上，只是由于它们是不可思议的小，它们仿佛不在地球上，而只是穿越地球。 科学家们怎样才能探测到这些来自太阳的粒子呢?

人们了解的探测来自太空的中微子的惟一方法是，在地球深处如矿井中放置一些巨大的装有各种液体的大桶，这些大桶应该加以保护使它们与别的辐射源隔绝，并寻找出中微子与大桶中的水分子或其他液体的分子极罕见的相互作用。 在地球的许多地方进行了这些实验。 1965 年，首批来源于地球之外的中微子被弗雷德里克·莱因斯和他的同事们在南非的一处金矿中发现。 与此同时，另一种形式的中微子——μ 子中微子——作为在布鲁克黑文国家实验室所作的核反应的副产品被发现。 在斯坦福线性加速器上发现的 τ 粒子提示存在另一类型的中微子。 在盐矿贮液器中寻找太阳的中微子的实验探测到的中微子个数都远远少于理论预言的个数，这使专家们惊得发呆。

不过，在这方面理论依然领先于实验结果。 20 世纪 50 年代后期，物理学家发展的理论表明，中微子可能具有使人吃惊的性质：它能够改变它的形式。 物理学家使用“振荡”这个词来描述这个现象。 因此，电子中微子可以变成 μ 子中微子或者 τ 中微子(每一个是根据中微子依附的重粒子：电子、μ 子或 τ 粒子来命名的)。 当一种类型比较容易被探测到时，别的类型则不易被探测到。 于是科

学家们断言某些来自太阳的中微子可能正在改变它们的类型以躲避探测。

20世纪80年代，在美国(俄亥俄州的一个矿井中进行的欧文—密歇根—布鲁克黑文项目)和日本位于号称日本阿尔卑斯山的高原北面30英里的一个锌矿中的神冈中微子观测站建造了巨大的探测塘。后者是一个容有125万加仑超纯水的地下蓄水池，四周由十分灵敏的光探测器包围着，其目的是探测单由一个中微子与水分子中的一个原子碰撞而发射的光线。1987年，这两个巨大的中微子探测项目都发现了由南半球观测到的位于大麦哲伦云中的超新星爆炸产生的中微子。这些中微子穿越地球到达这两个探测地点。它们是首批被确认为来自我们的太阳系外的中微子，对它们的探测预示着中微子天文学的开始。

1998年6月5日，在日本高原的一次记者招待会上宣布了使人震惊的消息：在中微子观测站工作的120位物理学家组成的美国—日本小组在实验室水平上已经能肯定，难以捉摸的中微子具有质量。这个发现具有深远的成果——它可以推进我们对物质的本质、宇宙的形成和它的密度的了解。日美联合小组通过在实验室中探测到中微子确实能够转换从电子到 μ 子或 τ 介子等等的“味”，从而得出中微子具有质量这个结论。根据量子论，能做到这一点的必定是具有质量的粒子。中微子实际的质量还未能确定。但是，中微子具有质量这一事实意味着宇宙的某种“遗失的质量”确实已被找到。什么是“遗失的质量”？

恒星聚集在星系之中。一个星系通过它所包含的恒星的总的相互间引力的拉动而将这些恒星聚集在一起。当我们观测到太空越来越深的部分时，我们发现星系的位置并不像我们可能以为的那样是随

机的，相反，存在一种结构。国际商用机器公司研究中心和耶鲁大学的贝诺瓦·曼德尔布罗特(Benoit Mandelbrot)在几年以前发现，星系分布的结构很像不规则的碎片形——本质上有次序的排列，它肯定不是随机的，即使局部看上去像随机的。星系形成星系团，星系团本身又置身于超星系团之中——以致越来越大的规模。在星系团之间是庞大的空无所有的空间气泡，大小范围达几百万光年的真空。

20世纪30年代，天文学家开始注意宇宙的结团，即星系成团的事实。许多年来，在越来越大的视界内有关物质的分布的信息被收集起来。1986年，哈佛—史密森天体物理中心的玛格丽特·盖勒(Margaret Geller)、约翰·赫克拉(John Huchra)和瓦莱里·德拉帕朗(Valerie de Lapparent)构造了一张展示北半球天空中6000个星系的地图。这张地图以地球为中心，位于“馅饼”的顶端，延伸至6.5亿光年远的距离。从画面上看，结构的非均匀性是明显的，我们甚至可以看出不规则的碎片形性质是适用的。这种结构源出何处呢？

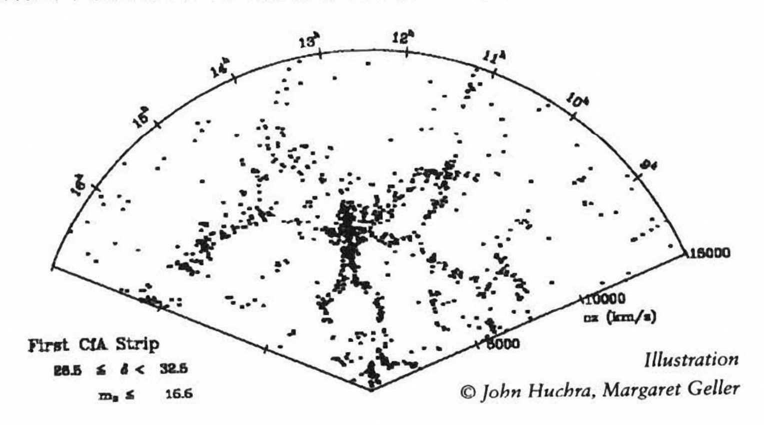


Illustration
© John Huchra, Margaret Geller

在宇宙诞生的最初时刻中的量子涨落被认为是形成物质气泡的原因，然后当宇宙膨胀时，这些气泡逐步扩大。由引力而产生的宇宙中物质的相互吸引形成了我们现在观测到的星系团和星系墙。但

是，当科学家们试图解释这些星系内的引力效应——使这些星系聚集起来的力时，一种神秘的不一致性使他们陷入了困境。

在天体物理学家研究的每个星系中，由可见物质(星体或气体和尘埃)所提供的质量远远少于通过计算指出的为了使星系能通过引力将本身聚在一起而应该有的质量。科学家们无法躲避的结论是：有另外的一种质量，占星系的总质量的 90%，渗透于这些星系之中。这种神秘的不可见的但可察觉到的质量称为“暗物质”。这种物质必定属于科学尚未知道的一种形式。它不是重粒子——原子或亚原子粒子——它是某种以前没有见过的东西。暗物质的本质是天文学中最大的谜之一。

物质的性质是了解宇宙学的关键。我们的宇宙究竟是物质主宰的，还是某种不同于物质的更重要的东西在决定着宇宙的过去和未来? 这是宇宙学家们面对的最重大的问题之一。除了我们根据它对星系所起的效应可以探测到的暗物质外，一些宇宙学家设法去寻找他们认为是宇宙“遗失的质量”。这些宇宙学家相信“遗失的质量”必定存在，因为他们相信宇宙是平直的，也就是说是欧几里得的。为了使宇宙是平直的，宇宙中必须有比我们能看到的或者从对星系的引力研究中计算出来的要多得多的质量。大多数暴胀宇宙理论和相关的宇宙理论的平直几何学模型是建立在这样的假定之上的，即宇宙存在临界密度，并且如果宇宙中真实的平均质量密度等于这个临界质量密度时，几何学是平直的。

信奉这种观点的理论家正在寻找“遗失的质量”。当中微子被发现时，这个发现使得中微子可能掌握着“遗失的质量”的关键这种希望大增。然而，即使中微子确实有质量——并且在宇宙中有着许多的中微子——相信这些额外的质量仍然远远少于“遗失的质量”。

因此，或者是有别的巨大的质量来源隐藏在宇宙中，或者是宇宙的质量密度太小。如果真是小于临界质量，那么按照预言，宇宙将永远膨胀下去。只有当质量密度大于临界密度，宇宙才可能因引力而自身坍缩直至发生大收缩，并可能从接着的另一次大爆炸中产生一个新宇宙。

关于宇宙质量密度的问题，宇宙是由质量还是别的什么东西主宰，以及是否有“遗失的质量”存在，所有这一切导致一个重要的概念：宇宙的整体几何学。爱因斯坦在他最初的场方程中假定宇宙是由质量主宰的。然而，当宇宙常数被引入时，对另一种可能性的大门又被打开了。这种新的模型可以解释质量与引力的效应，又可解释某种别的东西——一种不可见的对抗引力的力，真空的某种神秘的能量。爱因斯坦的方程不屈不挠地追寻着空间的本质：它的几何学。

第十四章　宇宙的几何学

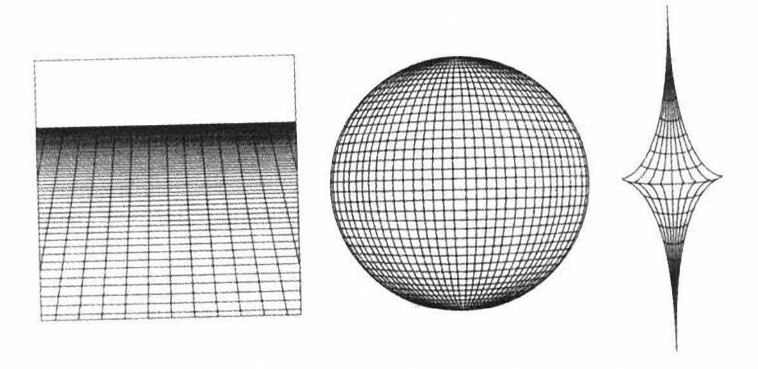
“上帝永远按几何学办事。”

——柏拉图

我们现在面临的是一个有趣的问题：宇宙的整体几何性质是什么？我们知道局部情况下，即一颗恒星或别的大质量物体附近，空间是弯曲的。如日食实验做证明的那样，空间围着物体球面发生弯曲。但是宇宙的整体形状是怎样的呢？几何学是直接与数学方程相联系的。从爱因斯坦场方程的研究中，我们将得到关于宇宙几何学的看法。

宇宙的几何学有助于决定它的最终归宿。数学家们已经确认了宇宙整体三种可能的几何学。第一种是平直的欧几里得几何。在欧几里得宇宙中空间的曲率被定义为零。曲率是由高斯命名的一个概念，用字母 k 表示。这里假定宇宙是一张处处曲率不变的曲面。对于平直的宇宙，我们说曲率为 $k=0$。非零常曲率曲面分成两大类。

或者曲率是正的，我们用 $k=+1$ 表示它，或者曲率是负的，可以写成 $k=-1$。曲率 $k=+1$ 的曲面是“闭的”。在空间为二维时，这种曲面是一个球面。当曲面具有曲率 $k=-1$ 时，它是“开的”，并且其几何形状是双曲型的，就像高斯、鲍耶和罗巴切夫斯基的模型中那样。其中，在空间为二维时，负常曲率的曲面是伪球面的外侧面。下面展示了这三种二维的常曲率模型。*



我们现在考察四维时空，或者等价地，使用这三种可能的常曲率几何学来追踪三维宇宙随时间演化的过程。我们将明白，为什么宇宙学家会使用“平直的”、“闭的”和“开的”这些词来根据宇宙的形状定义可能的宇宙类型。

爱因斯坦不带宇宙常数的方程是：

$$R_{\mu\nu}-1/2\,g_{\mu\nu}R=-8\pi GT_{\mu\nu}。$$

但是在各向同性、迷向和常曲率宇宙的假定下，上面的这张量值的方程(回想一下 $R_{\mu\nu}$，$g_{\mu\nu}$，$T_{\mu\nu}$ 这些量是张量，即它们表示一些元的列

* 在四维时空中，距离由相对论中的特殊度量来定义的。使用这个度量，负曲率的双曲空间用马鞍来粗略表示。

阵而不是简单的数)简化成一个数量(即非张量值)的微分方程，可写成：

$$(R'/R)^2 + k/R^2 = (8\pi G/3)\rho,$$

其中 ρ 是宇宙的质量密度。微分方程是一种将一个变量的导数和几个别的量联系起来的方程。这里，R 是度量宇宙大小的一个尺度因子。它的导数 R' 度量宇宙大小的变化率这个方程是爱因斯坦一般的场方程在“简单宇宙”情形下的简化方程，“简单宇宙”是处处以及在每一个方向上看上去都相同的宇宙，这个方程是关于宇宙的大小，即 R 的微分方程。在这个模型中假定了宇宙是质量主宰的，即它是质量而不是其他形式的能量构成主宰力量的宇宙。这就是我们能够用一个测量质量的纯数量来替代爱因斯坦的一般形式的能量—动量张量的原因。

当将 k 可能的值，即 0、+1 和 −1 代入上面的方程时，我们分别得到宇宙的质量密度 ρ 等于、大于或小于 $(R'/R)^2/(8\pi G/3)$。这个量非常有趣，它在宇宙学模型中起了关键的作用。首先，如果宇宙是闭的并且具有这样的曲率，那么宇宙的尺度因子元素 R 就度量了宇宙的曲率半径。量 (R'/R)，即宇宙大小的度量的导数与宇宙大小的度量本身之比等于哈勃常数，用 H 表示，它度量了宇宙的膨胀率(即与宇宙大小成比例的膨胀率)。

整个量 $(R'/R)^2/(8\pi G/3)$ 是宇宙的临界密度。我们知道，当宇宙恰好达到这个密度时，即 ρ 等于上面的表达式时，曲率定为 $k=0$，是一个平直宇宙。当 ρ 大于这个表达式，则 $k=+1$。此时，宇宙比临界质量重，因此最终本身将坍缩。当 ρ 小于这个临界密度

时，几何学是双曲几何，因为 $k=-1$。此时，宇宙中没有足够的质量，并且引力也没有大到将宇宙拉聚在一起——它将永远膨胀下去。在平直宇宙的情形中，宇宙仍然将永远膨胀下去，但是速率不断地变慢。*

宇宙学家们对宇宙在给定时刻的实际质量密度 ρ 和上述表达式给出的临界密度这两个密度之比给了一个特殊的名称 Ω。

Ω 对宇宙的几何性质是关键的。假定没有宇宙常数，那么下面的事情是真的。当 Ω 等于 1 时，即密度等于临界密度时，宇宙是平直的——它将永远膨胀下去，但是将不断地放慢膨胀的速率。

当 $\Omega>1$ 时，宇宙的质量密度大于使宇宙处于平衡的临界密度，结果宇宙减慢它的膨胀。这时宇宙具有比恰好减慢膨胀所需的更多的质量，因此宇宙在某一天将停止膨胀，并开始收缩直至不可避免地将万物吞没的“大收缩”。然后，或许会随着新的大爆炸重新诞生，继续着大爆炸和大收缩的循环，每一个新的宇宙都建立在以前宇宙的废墟之上。

在 $\Omega<1$ 的情形，宇宙的质量小于临界密度。宇宙没有足够的质量终止膨胀和引起坍缩，因此，宇宙永远继续膨胀。它的几何是双曲几何。

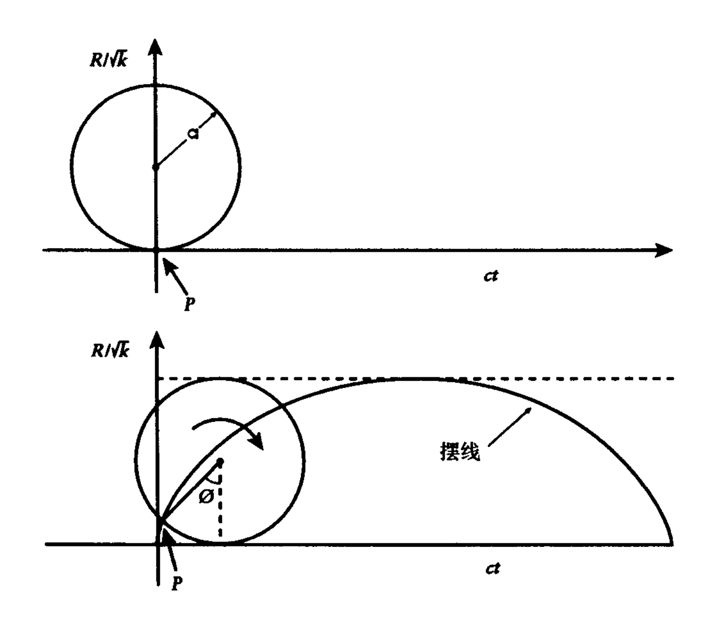
如果有了一个非零宇宙常数，在上面的每种情形，宇宙的命运就会有所不同，它与两个参数 Ω 和 λ 的值都有关。

宇宙的几何学是由这个三维宇宙如何随时间演化决定的。一个膨胀着，然后开始坍缩到自身上的球面形宇宙——$\Omega>1$ 的宇宙——

---

* 我感谢杰夫·威克斯为我从场方程中推导出几何。

当作为时间映射时将画出一条摆线(这里我们省去了一个空间维数以便能在纸上画出它)。 下图展示这样的宇宙。

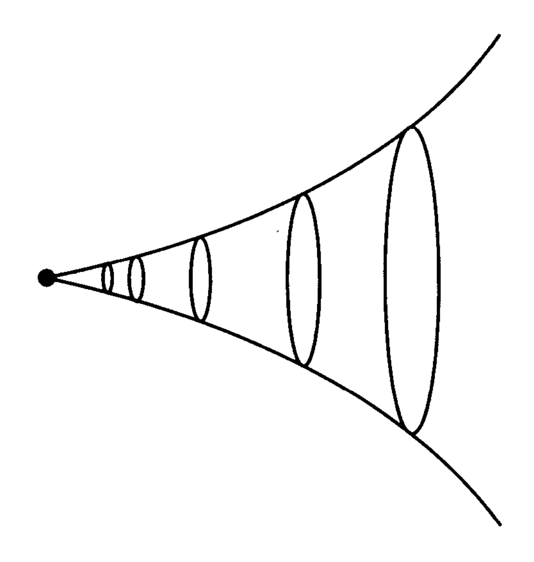


平直的宇宙，即 $\Omega=1$ 的宇宙将以逐渐变慢的速率膨胀。

$\Omega<1$ 的宇宙将以不断增快的速率膨胀，如下图所示。

但是，如果在宇宙中有某种别的东西影响它的膨胀、几何和密度，那么会发生些什么呢? 如果在空间中有某种“古怪能量”出现，某种我们既不能看见又不能感觉到或探测到的，但是却对时空的结构起着作用，使时空膨胀得比没有它时更快的东西，那么它不会单单只产生物质和引力，还可能会有某种别的东西在场。

由于这种可能性，科学家们倾向于更改 Ω 的定义。 必须给这个拥有开启我们宇宙的钥匙的参数一定的自由度来解释未知的现象。宇宙学家们决定将整个 Ω 做一分割：起因于物质的部分和暂时标示为起因于爱因斯坦过去的宇宙常数的部分。 于是，决定宇宙几何学

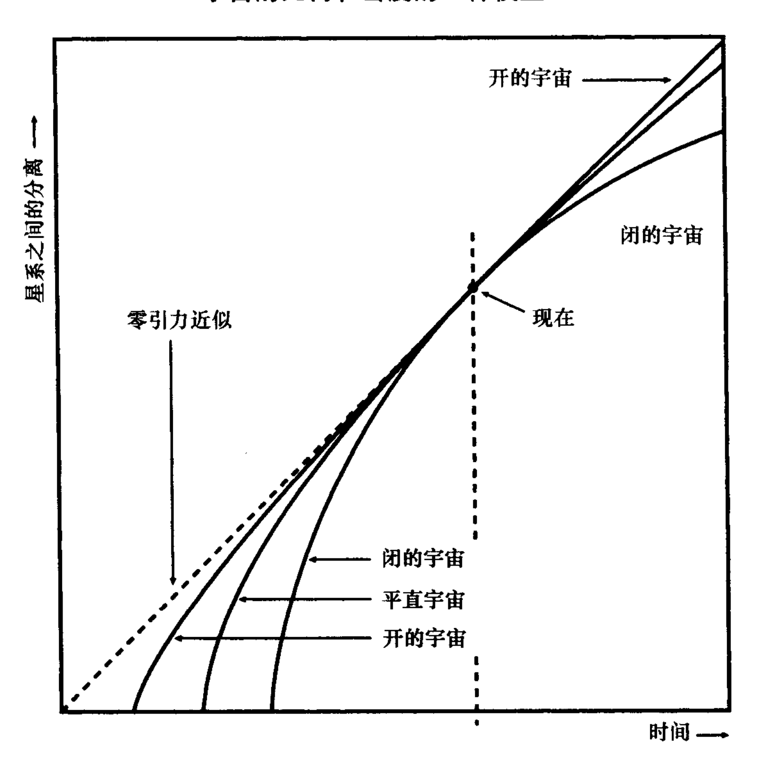


的参数现在被分割为 $\Omega=\Omega_M+\Omega_\Lambda$。尽管 Ω 决定了宇宙的几何学，但是宇宙的命运却几乎完全由“古怪能量” Ω_Λ 决定。爱因斯坦宇宙常数的能量有着如此巨大的潜在威力以致它能永远推动着宇宙膨胀而与 Ω_M 的值是多少没有关系。

这种决定宇宙的几何学和归宿的可能性推动了索尔·珀尔马特和他的同事们在 1988 年创设了超新星宇宙科研项目。这些科学家想用天文学观测设法估计这两个 Ω 参数的值。他们将通过研究他们的“标准烛光”——Ia 型超新星的光曲线来完成这个任务。但是，这个由杰出的宇宙学家组成的小组得到的结果远远出乎所有人的意料。经过几年收集观测数据并进行计算之后，对这个小组而言，某种从未被观测到，也没有被科学界想到过的巨大的未知力在宇宙中起着作用这个事实变得明白无疑。Ω_M 的值比任何人估计的要小。宇宙尽头爆炸着的星星正在讲述着一个奇怪而令人神往的故事：宇宙没有足够的质量使任何以物质为基础的理论能成立，并且一种不可见力推动着万物越来越快地分离。爱因斯坦宇宙常数及对应于它的项 Ω_Λ

具有不可估量的重要性。然而，这些发现关于宇宙告诉我们的是什么?

宇宙的几何和密度的三种模型



第十五章 伊利诺伊州巴达维亚，1998年5月4日

“宇宙太轻。”

——内塔·巴考尔

保罗·斯坦哈特——最年轻一代的物理学家之一——创立了新的宇宙科学。他生于1952年，并于1978年在哈佛大学获得物理学博士学位。他研究粒子物理，但不久就将其注意力转向宇宙学。斯坦哈特是宾夕法尼亚大学的教授，研究古思的暴胀模型。不像许多其他的人那样，斯坦哈特并不承认暴胀为事实——他要保持思维的自由，他让数据——天文学的观测结果、宇宙辐射测量结果和别的物理信息——说话。斯坦哈特不久就认识到有趣的并且潜在的非常有前途的暴胀模型存在一些理论上的问题。其中最要紧和深刻的问题是，尚不清楚的终止暴胀并且引起其后我们相信现今正在发生的较温和膨胀的作用过程。

保罗和一个博士生，安迪·阿尔布雷克(Andy Albrecht)一起研究，

最终解决了这个难题，他们通过修正古思的暴胀模型使得膨胀——以及引起膨胀的场——将以更克制的速率进行，这仍然达到了暴胀在解释物理现象方面的目标，不过，与此同时，这种膨胀在本质上可以在某个时刻终止。然后，保罗继续研究称为延拓暴胀的模型，其中有另一个场与引力相互作用。在这个理论中，宇宙出现的最初时刻的引力常数与现在的常数是不同的。因此，爱因斯坦的场方程中的 G 项在宇宙的初生期不是一个常数。在这个最初时刻——称为普朗克时间，从大爆炸开始延续 10^{-44} 秒——量子效应起着作用。在宇宙出现的这个非常早的阶段，量子作用过程对于整个宇宙将发生什么现象起着作用，而爱因斯坦经典的相对论在这里行不通。需要有一个新的领域——量子宇宙学，保罗·斯坦哈特对我们了解这个尚未成熟的重要理论作出了贡献。

1995 年，当时斯坦哈特正在仔细思考各种来源的物理学和宇宙学的研究结果，他感到这些结果都指向一个方向：宇宙似乎正在加速它的膨胀。这与直觉是完全相背的。当引力——所知的宇宙中惟一的远距力——的理论告诉我们，从大爆炸开始的膨胀由于物质对所有别的物质的拉动而应该逐渐变慢的时候，为什么宇宙会有如此的行为?

1997 年 9 月，为了解答这些宇宙学的研究结果，保罗·斯坦哈特认定组织一次由来自许多与宇宙学有关的领域中的实践者：天文学家、天体物理学家、实验物理学家、粒子物理学家、应用数学家等等参加的会议来讨论宇宙中正在发生的事是一个好主意。这些不同领域中的科学家们对新的发现和它们可能有的意义会作出什么解释呢? 斯坦哈特决定，举行这一会议的最好地点是伊利诺伊州巴达维亚的费米国家加速器实验室(简称费米实验室)。在那里，正在进行着许多重要的实验，力图在早期宇宙的模拟条件下了解物质的本质。斯坦哈

特与费米实验室的乔舒亚·弗里曼(Joshua Frieman)一起，为 1998 年 5 月举行的会议做了安排。

1998 年 1 月，由珀尔马特和超新星宇宙学项目小组研究的首批 8 颗超新星的资料发表在《自然》杂志上。* 资料似乎隐含着时空中遥远的星系，诸如小组所研究的 8 颗，可能比附近的星系退行得慢。这个小组还拥有对另外 60 个有 Ⅰa 型超新星的星系的观测结果，这些观测尚待分析。其他这些星系的数据会不会确认这个倾向呢？如果确认，那么这些观测结果将提供更多的证据，表明宇宙在当今膨胀得比它在过去更快。

1998 年 1 月在华盛顿举行的美国天文学会会议上，珀尔马特的小组提交了他们的暗示宇宙可能在以比期望中还要快的速度膨胀着的结果。哈佛—史密森超新星小组后来也宣布了与珀尔马特的假设相符的一些结果。以内塔·巴考尔为首的普林斯顿大学的一个小组以及以鲁思·戴利为首的普林斯顿大学的另一个小组也宣布了支持这个假设的结果。他们的研究表明宇宙的总质量将永远不足以终止宇宙的膨胀。

内塔·巴考尔出生于以色列并在那里受教育。她在希伯来大学学习数学和物理，并于 1965 年在魏茨曼研究所获得硕士学位。那一年她遇见她未来的丈夫约翰·巴考尔(John Bahcall)，他是加州理工学院的物理学教授，当时正在访问魏茨曼研究所。两人在次年结婚并移居加州理工学院，在那里内塔在威廉·福勒(William Fowler)** 的指导下继续攻读她的核子天体物理学博士学位。福勒几年后获得诺贝

---

* Perlmutter, S., et al., "Discovery of a Supernova Explosion at Half the Age of the Universe," *Nature*, Vol.391, January 1, 1998, pp.51—54.

** 威廉·福勒(1911—)，美国核子天体物理学家。——译者



内塔 · 巴考尔

罗伯特 · P · 马修斯(Robert P. Matthews)摄于普林斯顿大学通讯系。

尔奖。巴考尔的研究集中于发生在星体内部并使它发光的核反应。1970 年，巴考尔在特拉维夫大学获得博士学位。她对天文学非常有兴趣，参与了加州理工学院天体物理学家们的合作研究项目，研究类星体和别的天文学现象。

1972 年，内塔和约翰 · 巴考尔使用以色列的内盖夫沙漠中刚建成的怀斯天文台望远镜观测星体。他们在天文台附近有睡觉的住房，但是没有人代为照管孩子，因此，他们将两个小孩，3 岁的萨菲和不足 1 岁的丹，一起带到天文台，拉出抽屉铺上毯子作为小孩的床。当他们的孩子睡着时，内塔和约翰发现了第一个食双星光学系，它也是卫星探测到的第一个 X 射线双星系。引起气体发射 X 射线的致密物体是一颗脉冲星——此前发现的第一颗脉冲双星。这是天文学中非常重要的发现，因而以色列选举内塔 · 巴考尔为当年的科学女士。

巴考尔夫妇移居普林斯顿后，内塔成为普林斯顿大学的天体物理学教授，约翰则成为高级研究院的自然科学教授。1998 年，约翰 ·

巴考尔获得克林顿总统颁发的国家科学奖章。内塔·巴考尔担任了6年的空间望远镜科学研究所的科学评选办公室的负责人，在那里，她通过帮助为哈勃望远镜挑选重要的天文学项目对科学作出了巨大的贡献。在那些年中，她的兴趣转移到宇宙学方面，她越来越对天文学的发现如何能阐明宇宙的结构、它的起源、年龄和最终的归宿感到兴趣。内塔·巴考尔花了许多年的时间尝试回答宇宙学的问题。她的研究非常有成效，基于她的种种发现，她在1997年当选为美国国家科学院院士。

在1998年1月的美国天文学会的会议上，内塔·巴考尔提交了根据她和她的同事们所完成的大量研究得到的结果，这些研究中使用了几种不同的“称量”宇宙的方法。这些研究者利用了星系团来研究宇宙中物质的演化和物质的分布。其中一个方法使用了爱因斯坦的引力透镜效应。利用这个方法对遥远星系发出的光线在它弯过离我们较近的星系时做了观测，光线的偏折量提供了这个较近星系的质量的信息。另一个方法研究了星系内的热气体以及速度、红移和宇宙中质量和光之比。巴考尔研究了星系的晕圈，她的研究指出其中含有许多暗物质。根据所有这些研究，内塔·巴考尔得出结论：宇宙的质量密度只达到为使膨胀变慢并最终坍缩所需要的密度的20%。这个数字是使用了几种不同的研究方法得到的。经计算，这个结论错误的概率小于百万分之一。*

关于珀尔马特、巴考尔和他们的同事们的惊人新发现媒体做了大量的报道。这个新的发现超出了人们的想象。不用多说，每一个人——从科学家到普通老百姓——都希望有一个“被遏制的”宇宙，

---

* 统计学的p-值小于10^{-6}。

它或许是爱因斯坦静态模型的残迹。如果宇宙真的是膨胀着的而不是稳态的——像哈勃在 20 世纪 20 年代的研究首先说的那样，一个令人吃惊的宇宙——那么人们要求它至少在膨胀和收缩之间来回摆动，一个交替膨胀和收缩的宇宙包含着最终重获新生的可能性，尽管这是将来的一件惊人的遥远的事。一个永远膨胀着的并且毫无希望再收缩以及重返当初的大爆炸的宇宙则是一种使人不安的景象。因此，当五月会议在费米实验室举行时，媒体纷至沓来。

聚集在费米实验室的科学家们关心的是比一个永远膨胀的宇宙更为基本的问题，这就是物理学的命运，这些科学家们正面临着一个无法避免的结论：在宇宙中正发生着某种非常古怪的事情——没有一个科学家能说清楚的某种事情。大自然的宝库中似乎有第五种力存在，一种从未被直接地观测到过的力。这种感觉是所有在场的人：物理学家、粒子理论家和天文学家共同的猜想，是由对会上提交的各种发现所作的专门性解释共同形成的。科学家们被训练成持怀疑论的人，他们需要看到使人信服的证据才会同意抛弃旧的理论而赞同新的理论。当所有的人聚集在一起时，总共 60 个人，戏剧般的发言开始了。

威廉·普雷斯(William Press)——哈佛—史密森小组的一位天文学家——在他的小组和伯克利小组报告他们的发现时扮演了这两个超新星小组的答辩人的角色。“倘使这些结果不正确那将怎样?”是个大问题。索尔·珀尔马特和对手组的一个成员罗伯特·基尔希纳(Robert Kirshner)为他们小组的发现做了答辩。这些数据存在许多潜在的问题。首先，超新星是否真的是“标准烛光”?* 我们如何知道

* 到 1999 年春天，科学出版物中的许多研究论文确认，可以认为超新星是有很高准确性的标准烛光，以及由此得到的对距离和速度的估计具有很高的可信度。

一颗70亿年前发生的 Ia 型超新星与只在5亿年前发生的超新星有着相同的光曲线？其次，还有一个涉及小组为使数据可做比较而对发光度数据所作的校正的问题。这种校正行得通吗？最后，还有在所研究过的星系中意料之外地缺少尘埃的问题，为什么探测不到尘埃？

这两个小组对细节进行了长篇的技术方面的解释，他们对问题的回答似乎使所有的人都感到满意。举行了一次民意投票，科学家们的投票几乎是压倒性地赞同承认这些新信息在科学上是可信的。现在无法回避一个必然的、甩不掉的问题：正在驱动宇宙加速膨胀的是什么？按理说，宇宙的全部质量应该尽到它自己的力量。由于分布在整个宇宙的星系中的质量的存在，从大爆炸开始的膨胀应该以某种方式变慢。但是，明显的，1998年5月的日子里，在费米实验室里提出的证据似乎表明没有这样的事发生。宇宙不拥有足够的质量使膨胀变慢。某种神秘的力正在真实地加速着膨胀。真空有某种负压力——与所有的科学不相容的某种东西。难道不是这样吗？

费米实验室的迈克尔·特纳(Michael Turner)在他的笔记本上写道："宇宙中有某种古怪的能量。"他还画了一张图画，其中画有星星、搔着头皮的人和一个大写的希腊字母 Λ。他的图画刊登在《纽约时报》(1998年5月5日)的科学版的头版上。在提到宇宙常数时，特纳说："对爱因斯坦足够有用的东西，对我们来说也应该有用。"

但是和新理论，例如暴胀理论打交道的宇宙学家们想走得更远一步。原则上，宇宙常数可以用来说明宇宙中那种将空间向外推移，对抗引力并使宇宙向无穷远处加速的神秘的力。不过，按照暴胀理论的说法，在宇宙中曾经有一种类似的力，它使宇宙在紧随大爆炸之后的极其短暂的若干分之一秒内以指数速率膨胀。因此，宇宙常数对那段时间也适用。但是，这里就产生了一个问题。这个不可见力

在紧随大爆炸之后的初发瞬间的大小必须不同于它现在的大小。 科学怎么能接纳一个会变化的 Λ?

对这样一个可能解答许多现代宇宙学之谜的重要问题的一个自然的答案将是，使宇宙常数成为一个宇宙学变量——时间或爱因斯坦方程中其他变量的函数。 但是没有人知道如何去做到这一点。 爱因斯坦已经去世 40 多年，也似乎没有人具有这种勇气、洞察力和学识能以当年爱因斯坦在最要紧之处插入宇宙常数时所体现的爱因斯坦方式去更改他的方程。

爱因斯坦的后继者们，专攻广义相对论的物理学家们花了许多时间去解爱因斯坦的方程。 为此目的，他们使用了成套的古老的和当代的方法：有些人在计算机上做数值计算，另一些人则进行理论上的推导来解复杂的微分方程。 但是，这些物理学家并未尝试去改变爱因斯坦的方程使它适合新的发现和新的理论。

爱因斯坦的场方程有如一个偶像。 这个方程是由一位杰出的大师创造的。 那里的每一个张量、每一个常数、每一个细微的元素都有它存在的理由。 这个张量方程是为保持宇宙的定律而设计的。 这些定律是不变的——它们不会因为人们从不同的角度观测物理过程而改变，也不会因不同的坐标系而改变。 在极限状态，这个张量方程给出适用于非相对性条件下的较简单的牛顿法则。

爱因斯坦通过巧妙地调节度量张量，在方程中包括了他后来认为是误加上去的一项，使空间弯曲了那么一点儿，刚好适合这个常数而又不致失去他曾工作了那么多年赋予他的方程的那些性质。

难道只要使这个常数变成一个新的变量就行了吗? 也许即使是最杰出的大师也无法完成这样的功绩。 于是，那些认为它可能是解释宇宙中“古怪能量”的好想法并且也想借此机会支持暴胀理论的宇宙

学家就尝试做下一件最好的事情：发明一个新概念。

保罗·斯坦哈特寻求到这样的一个替代模型。仿照亚里士多德的第五种宇宙元素的称呼，他称它为“第五种基本物质”(quintessence)。“不可见力”的这个名称是对第五种自然力的间接称呼。前面四种物理学已知的力是引力、电磁力，以及弱核力和强核力。“第五种基本物质”将是第五种力，还没有人观察到它。斯坦哈特在不断地寻找一种方法将“第五种基本物质”结合进爱因斯坦的场方程中。不管理论最终能否行得通，斯坦哈特对现在的谜团做了总结。“宇宙中有负压力，”他对我说，“现在一件事是清楚的，那就是 Ω_M 小于 1。这意味着什么？曲率，‘第五种基本物质’，Λ？——我们不知道，但是不论它是什么，它对基础物理有影响是肯定的。”

第十六章　上帝的方程式

“我想知道上帝的想法。”

——阿尔贝特·爱因斯坦

爱因斯坦的宇宙常数从未真正地消亡，即使它的发明者已经对它撒手不管。在他的专著中，史蒂文·温伯格追踪了这个难以捉摸的常数的奇异经历。* 温伯格展示了爱因斯坦的方程加上这个常数后，如何会使真空的全部有效能量增添一个等于 $\Lambda/8\pi G$ 的项。问题是，这个常数是否反映了真空中所有的能量，或者说是否还有某种更多的东西将我们的宇宙向外推。如果宇宙常数负有全部责任，那么它必须有多大？

20世纪60年代和70年代，粒子物理学家对宇宙常数发生了兴趣，因为他们必须估计空无一物的空间的能量水平，以便将这种能量与他们在加速器中研究的粒子具有的能量区分开来。但是，不管他们怎么努力，粒子物理学家总无法使他们所期望的出现在真空中的能

量总量与因使用宇宙常数而提供的能量相匹配。结果，粒子物理学家们放弃了他们的尝试。然而，大约就在那个时候，宇宙学家们重新找到这个受冷落的常数并试图为他们自己的应用而启用它。20世纪60年代后期，宇宙学中有一个紧迫的问题尚未得到清晰的回答，这就是类星体问题。

类星体(或者说类似恒星的物体)释放大量的辐射能量，天文学家能探测到这种能量。令人费解的是，发现了红移约为 $z=1.95$ 的大量的类星体。这些类星体在时间和空间上都离我们非常遥远(如同它们的红移和它们离我们退行的速度指示器清楚地表明的那样)，几乎都是差不多同时形成的。但是，为什么会这样？宇宙学家们知道，如果宇宙在这些类星体形成的那段期间膨胀得不那么厉害，结果，将它们安置于离我们距离都差不多的地方，那么就可以解释这个现象。因此，所希望的是，宇宙能在对应于这些类星体的估算年龄的那段时间能保持固定的尺度 R。使宇宙的膨胀在给定时刻变慢或退至停止的一个方法是应用宇宙常数。一些宇宙学家花了许多年时间尝试用宇宙常数给出这个谜的正确回答。**

接下去有更多的粒子物理学家加入进来。这一次，他们试图回答有关弱电理论中的自发的对称破缺问题。对称破缺是一种作用过程，人们相信这个过程在宇宙早期形成了各种类型的粒子。根据粒子物理，由于电子不同于夸克，因此“对称性”必须破缺才能产生两个不同的粒子。理论学家面临着一个问题：其中的某种密度计算给出负数。但是，理论学家发现，将宇宙常数 Λ 应用于他们的方程就

---

* Steven Weinberg, “The cosmological Constant Problem,” Moris Loeb Lectures in Physics, Havard University, May 1998.

** 类星体现象还有另一种解释。我感谢艾伦·古思提醒我这一点。

会消去一个关键的项，从而给出这个关键问题的一个正数答案。然而，附带的效果是，这隐含着在遥远的过去 Λ 必须非常大。直到古思的暴胀宇宙理论出现之前，这个推断使人迷惑不解。如果宇宙常数在大爆炸后非常短暂的瞬间真的是非常大，那么它可能就是在那段期间驱动宇宙呈指数式地膨胀的力。因此，在方程中加上这个常数意味着，我们必须非常小心地选取这个常数的值。

科学需要有创见的新理论，这就需要新的数学。通过不断试错法对爱因斯坦的方程修修补补是远远不够的。这个引人注目的方程许多年来一直有着极为出色的表现，总是导致与方程的预言惊人地一致的物理新发现。但是，在人们试图使用包含宇宙常数的方程时——或试图将这个相对论方程与量子论结合起来时——所得的结果却很浅薄。人类对这个神奇的方程的了解还远远不够。

1985 年，出现了一种在导致物理学中许多问题的解决方面似乎很有前途的理论：超弦理论。在超弦理论中用来模拟宇宙的方程使用了 11 个维数。在这个意义上，这个理论将空间的四维推广为十一维。这个理论的结果是诱人的，但是，它们还没有解决爱因斯坦宇宙常数的问题。20 世纪 80 年代末，数学家们创立了压缩掉 2 个维数的超弦理论的变种。然而，当他们试图将结果推广到四维时空时，这种技术失败了，并且整个结构崩塌。

1996 年 12 月，伦敦的报纸报道了著名的宇宙学家斯蒂芬·霍金 (Stephen Hawking)“正在举办一个速成的数学课程”。* 牛津大学的一位数学教授将要讲述四维曲面的拓扑学以及它们与广义相对论和量子

* H. Aldersley-Williams, “May the Force be with Us?” *The Inependent*, December 2, 1996, p.20.

论的关系。霍金和其他的宇宙学家对此非常感兴趣。这位数学家清楚地发现了四维曲面和只在四维空间中发生的“古怪的”物理现象之间的一种奇怪的关系。罗杰·彭罗塞爵士是一位著名的拓扑学家，曾成功地将这门抽象的数学学科应用于物理学问题，他这样描述这个发现：“他所作的是利用关于基本粒子性状的一些想法去证实纯粹数学中一个完全令人意外的结果。在所有的维数中，只有四维是惟一的具有这个性质的维数。”从这位数学家在纯粹数学中的工作中可以隐隐约约地看出，宇宙学家和物理学家为什么会如此难以处理宇宙常数和另外的一些问题的原因：四维几何是反常的“行为出格”，各个维数中只有它如此。显然，我们倒霉地生活在一个四维宇宙中(3 个空间维和 1 个时间维)，至少就物理学而言是这样的。

宇宙学家因这个新成果而变得大胆起来，从中看到了新的机会，开始了工作，他们把关于四维空间拓扑学的结果结合进他们自己的与相对论和量子论有关的理论中去。他们的目标不只是确定宇宙常数——而是试图完成物理学家最高的目标：统一场论，它将所有的自然力结合在一起。在设法实现这个目标的过程中，宇宙学家们踏着爱因斯坦本人的足迹前进。爱因斯坦在 1932 年移民到美国并在高等研究所工作以后，将他的余生花在尝试统一物理学的各个领域上。

阿尔贝特·爱因斯坦以巨大的热情继续着他对知识的科学追求。他是一个真挚的信仰者，对他来说，科学就是发现上帝的创造物的过程。我们今天的许多最伟大的科学家被类似的追求所驱使。他们是第一线的指望解开万物之谜的研究人员。这些科学家思索着关于宇宙来自何处，它可能会走向何方和它的形状是什么这些深奥的哲学问题。

1997 年时，斯蒂芬·霍金说，他相信在 20 年内我们将会了解宇

宙的根本法则。对此持异议的宇宙学家们立即指出，20年前霍金做过同样的预言。但是，霍金好像已经胸有成竹的样子。模仿爱因斯坦那样，他说："我们正在接近上帝。"* 1998年3月，霍金展现了他的才能。他使用了瞬子(instanton)的概念试图解释大爆炸。霍金和他的合作者说，这个概念使科学更接近"万能理论"，一个月后，以一种典型的强烈的戏剧效果，当时正在访问加利福尼亚的霍金和他的刚回到伦敦的合作者尼尔·图罗克(Neil Turok)同时宣布了新的理论。但是，霍金不是爱因斯坦，他对上帝的祈求，像爱因斯坦习惯的那样，就可能不那么灵。到此刻为止，霍金和他的合作者们还没有提出一种独一无二的能与阿尔贝特·爱因斯坦的理论相提并论的理论。

到目前为止，这些科学家们完成了什么呢？霍金和图罗克从艾伦·古思的暴胀模型出发，在1998年宣布关于宇宙是"开的"，并且由于它永远地膨胀下去它最终将充满的空间范围是无限的这一发现之前，他们提出了下面的问题：暴胀真的像绝大多数暴胀支持者相信的那样必须是一个"平直的"宇宙，还是它可以产生一个开的宇宙？霍金和他的合作者詹姆斯·哈特尔(James Hartle)几年前曾试过一种类似的方法，利用具有传奇色彩的美国物理学家理查德·费曼(Richard Feynman)发明的路径积分的技巧将暴胀应用于一个闭的宇宙。

1995年，并不相信平直的或闭的宇宙的图罗克，在剑桥做了有关开的宇宙的研究结果的报告。他的报告引起了斯蒂芬·霍金的注意，两人开始一起工作。他们尝试将哈特尔和霍金采用的方法应用于开的宇宙，但是，很长时间没有成功。问题在于无限性。在方程

---

* *The Observer*, November, 23, 1997.

中出现一个无限大分量使得费曼路径积分失效。有一天，图罗克正在霍金的黑板上写数学表达式，突然，霍金通过充当他喉舌的电脑叫住了他(霍金除了一个手指外都麻痹了，这个手指操作电脑鼠标使他能用机器声音讲话)。图罗克显然犯了错误，忽略了方程中的一个项，这个项实际上是非常重要的。他们继续改正表达式，结果这个无限大分量奇迹般地消失了。他们面前拥有的空间刻画了宇宙从大爆炸经过暴胀向着一个开的宇宙的演化——在它的开始没有奇点。

图罗克和霍金建议用瞬子替代奇点，瞬子是一种在空间和时间上高度压缩的粒子，具有一颗豌豆的质量，但大小却只有豌豆的 10^{30} 分之一。称它为瞬子的原因是，它是一种只存在一瞬间的一种粒子。在瞬子之前既不存在空间也不存在时间。与大爆炸奇点不同，瞬子是光滑的。因此，当瞬子爆炸时，正如艾伦·古思预言的那样开始宇宙暴胀。结果从瞬子跃出的宇宙就永远膨胀下去。时间，以及在今后岁月中对太空的观测或许会告诉我们，这些理论中的哪些理论是正确的，我们的宇宙是如何开始的，是否可能统一所有的自然力，以及宇宙常数是否是那个万能的物理方程的一部分。

大多数科学家同意，宇宙必定是从一次在炽热的致密状态下的巨大膨胀——某种大爆炸——中开始的。这初始的巨大的膨胀创造了万物——形成物质和能量，接着形成星系、恒星和行星，以及不可见的神秘的暗物质。另一方面，在大爆炸后，各种观点和哲学癖好的歧异也开始了。索尔·珀尔马特通过世界上最强大的望远镜和仪器，比任何人都更接近于真实地观测到宇宙在膨胀，他是一位细心的科学家，他的发现将他引向一种特殊的理论。

索尔·珀尔马特于 1959 年生于伊利诺伊州的厄巴纳-尚佩恩。他的父母都是伊利诺伊大学的教师。当他还是一个小孩时，全家搬

到费城。在那里，索尔在贵格会学校上学。他的数学和科学课程成绩始终很优秀，因此，他花了更多的时间和精力学习人文学科——它们具有更大的挑战性，他也拉小提琴。索尔进了哈佛大学，1981 年毕业，获得哲学和物理学学位。然后他进入加利福尼亚大学伯克利分校攻读物理学博士学位。在那儿的几年里，索尔·珀尔马特轮流参加了几个劲头十足的研究小组。1982 年，他开始与研究分数电荷粒子的小组做研究，但是不久就改换与理查德·马勒(Richard Muller)教授指导的研究生小组一起工作。马勒是已故的独立特行的物理学家路易斯·阿耳瓦雷茨(Louis Alvarez)的亲密助手，后者和他的儿子沃尔特·阿耳瓦雷茨(Walter Alvarez)一起找到了 6500 万年前恐龙灭绝是由一颗大的小行星的撞击造成的证据。



索尔·珀尔马特
劳伦斯伯克利国家实验室

马勒和他的学生们正在进一步研究这种想法：他们采用对暗红色星体的天文学观测寻找称为报应女神(Nemesis)的星星。报应女神星

是一种推定中的伴随太阳的小行星，每隔5200万年绕太阳一周。当报应女神星每隔2600万年最接近太阳时，由于报应女神星的引力拉动与处于我们方向的小行星猛烈冲撞而发生质量消亡。如果报应女神星确实存在，那么发现它将不仅仅会解答恐龙怎么会灭绝的问题，而且也会解答为什么发生这种灾难以及别的此类事情。这个小组(使用视差法)测量了从星系目录中得到的总数为2000的可疑对象中的大约300颗星的距离，但是所有的星都被发现离得太远。由于各种原因搜寻工作后来停止了。索尔消失了一个月，在伯克利的一幢物理大楼的地下室中度过这段时光。他重新出现时带着新发明——一架自动望远镜。

索尔使用他的新的电脑控制的望远镜观测，通过对远距离星系的系统搜寻形成了他的探测超新星的独创技术。到1985年他已经得到了20个这种罕见的遥远星系中的爆炸的电子图像。

1986年，索尔获得加利福尼亚大学伯克利分校的物理学博士学位，下一年，他和他的同事卡尔·彭尼帕克(Carl Pennypacker)决定，索尔使用自动望远镜寻找超新星的技术可以用于测量宇宙的**减速率**。他们的决定反映了直到1987年的物理学界占主导地位的观点：我们的宇宙开始于大爆炸，由于它的所有质量的相互引力拉动，必须是在减速的。这个小组开始通过在澳大利亚的4米望远镜观测来做测量。他们发现$z=0.3$的超新星爆炸，但是进展缓慢。天气不允许经常进行观测，也还有另一些困难。这个小组，现在它的规模已变大，将它的观测中心迁到加那利群岛的拉帕尔马，在那里可以使用2.5米望远镜。科学家们现在已接近$z=0.45$，他们发展了一套方法，这使他们能够获得和处理更大量的星系观测资料，发现越来越多的超新星。他们能够通过网络直接将他们的结果发送到伯克利。

现在索尔已经在位于伯克利校区上方小山上的劳伦斯伯克利国家实验室担任研究职务，他以实验室为他的运转中心。随着他们日益增多的成功，小组成员获得了更大的望远镜的使用权。最终他们获准使用世界上最大的在夏威夷的两台10米凯克望远镜以及哈勃太空望远镜。遥远的爆炸结果源源流入，有着令人吃惊的规律性。但是，所有这些观测拍摄成的照片恰恰与科学界一直期望的结果相反。宇宙并没有在变慢它的膨胀——它正在加快步伐。根据对不同的z-水平上的观测，似乎在从大爆炸后的那个时刻起到大约700万年前这段时间内，宇宙确实减慢它的膨胀，但是，宇宙中的物质密度完全不足以减慢膨胀乃至使它终止。随着宇宙继续膨胀，它的质量被稀释了，使爱因斯坦的"古怪能量"得以替而代之。700万年以前，膨胀速率开始加速，宇宙现在正在一直更快地膨胀。

作为一个实验者，珀尔马特总是愿意倾听对他的数据的任何可能的解释。他坚持认为，对已有解释的任何更改必须作出最充分的阐释。但是随着新发现的汇总，到1999年春天，已经清楚的是，所有的这些测量都指明宇宙正在空前快地膨胀。根据珀尔马特的观测，他现在相信宇宙很可能是平直的——它的几何是欧几里得的——以及它将永远膨胀。这一次，珀尔马特小组收集了关于原有范围以外的星系的数据。小组研究了这些星系的红移和距离，这些星系是如此的遥远($z=1.2$)，以致在它们的光线离开它走向我们的时候，宇宙的膨胀仍然还在减慢。该小组将这些数据与他们采集的原有范围的星系($z=0.7$的星系)表明宇宙现在正在加速膨胀的数据做了对比——任何优秀的科学家都会这样做——以便测试他们提出的理论的适用限度。迄今为止，这个理论经受住了所有的测试。

根据小组的发现，珀尔马特也相信宇宙常数是重要的，这个常

数不是什么爱因斯坦“最大的错误”，而是这个决定宇宙、它的过去和它的最终命运的方程的组成部分。像许多其他主要的天文学家一样，珀尔马特也相信暴胀宇宙理论。因此，根据最新的天文学观测和被最广泛地认可的理论推导，我们的宇宙开始于一次非常巨大的空间膨胀，这种膨胀变慢达几十亿年之久，然后再加速并继续加速。如果这个结论是正确的，宇宙将永远膨胀下去。

罗杰·彭罗塞爵士对我如此说：“我们确实不知道在那里发生着什么事——大爆炸是完全令人惊异的事件。我不相信任何的关于我们没有发现的领域的理论，关于我们没有证据的婴儿宇宙的理论，也不相信关于更大的我们藏身于其中的宇宙的理论。没有客观的理由去相信任何这样的假想。”1965年，彭罗塞发表了他的定理，这个定理使用有力的拓扑学方法提供了大爆炸时空奇点的证据。“我相信宇宙具有双曲几何的性质，但是我不了解宇宙常数——我不相信它。至于暴胀宇宙理论——我是一个怀疑论者。这些人所作的是构造一个理论，而当证据不支持这个理论时，他们就改变他们的理论，然后一次又一次改变它。”

艾伦·古思用下面的话反驳这种论述：“虽然暴胀如何确切地起作用的细节尚未清楚，但是我认为暴胀的基本想法几乎肯定是正确的。暴胀提供了我听说过的仅有的使人信服的关于宇宙怎么会变得如此巨大、如此均匀和如此平直的解释。”

科学家们之间的争论无疑还将继续，因为他们试图解开宇宙之谜。但是，有一件事是所有的科学家都同意的，那就是爱因斯坦广义相对论的巨大力量，并且它永远继续有用。在最终的分析中，想要更完整地了解“上帝的想法”就需要将量子论的思想结合进相对论。但是，不管最终的方程会是什么，爱因斯坦场方程总将组成它

的重要部分。爱因斯坦在创立他的令人惊异的方程时，实现了他一生的梦想——他至少听到了上帝的一些想法。

这就是爱因斯坦的带宇宙常数的场方程，它是对上帝的方程的最佳估计：

$$R_{\mu\nu} - 1/2\, g_{\mu\nu} R - \lambda\, g_{\mu\nu} = -8\pi G T_{\mu\nu},$$

其中 $R_{\mu\nu}$ 是里奇张量，R 是它的迹，λ 是宇宙常数，$g_{\mu\nu}$ 是对距离的测度——空间几何的度量张量，G 是牛顿引力常数，$T_{\mu\nu}$ 是刻画能量、动量和物质的性质的张量，而 1/2、8 和 π 是数。

在他的《我的晚年》(*Out of My Later Years*)一书中，爱因斯坦关于他如何看待未来以及为什么他未能创立一个关于万物的统一理论做了提示。他写道：

> 广义相对论目前还是不完整的，因为能满意地应用广义相对论原理的还仅仅是引力场，而不是统一场。我们还没有确确实实地知道用什么样的数学机制来描述空间的这个统一场，以及制约这个统一场的普遍的不变法则。然而，一件事似乎是肯定的，即广义相对论原理将证明是解决统一场问题的必要的和有效的工具。

爱因斯坦懂得他的努力一直受到可利用的数学方法的限制。在发展狭义相对论时，爱因斯坦使用了洛伦兹和闵可夫斯基的数学。对广义相对论，他成功地使用了里奇和列维-齐维塔以及黎曼的数学。但是，爱因斯坦只能到此为止。他已经走上通向上帝的方程式

之路，但是要走得更远，他将需要新的数学。这种数学很可能在陈省身的普林斯顿演说中建议的方向上找到，它将包括几何学和拓扑学在更高水平上的抽象化。数学家将创造工具，物理学家将应用它们，天文学家将验证理论和提供数据，而宇宙学家则将绘制出我们宇宙的大写照。

一旦每门学科因其他学科的发展而得到支持时，我们就可以开始去了解宇宙的最终法则和表达我们人类对上帝的方程式的估计。当最终的方程式构成时，我们将能够使用它去解答奇妙的创世纪之谜。这或许是为什么上帝首先把我们送到这儿的原因。

参考书目

Bohm, David, *The Special Theory of Relativity*, Reading, MA: Addison-Wesley, 1979.

Bonola, Roberto, *Non-Euclidean Geometry*, New York: Dover, 1914. Includes the original papers by J. Bolyai and N. Lobachevsky.

Borisenko, A. I., and Tarapov, I. E., *Vector and Tensor Analysis*, New York: Dover, 1968.

Born, Max, *The Born-Einstein Letters*, New York: Walker, 1971.

Born, Max, *Einstein's Theory of Relativity*, New York: Dover, 1965.

Brian, Denis, *Albert Einstein*, New York: Wiley, 1997.

Calaprice, Alice, ed., *The Quotable Einstein*, Princeton, NJ: Princeton University Press, 1996.

Calder, N., *Einstein's Universe*, New York: Penguin, 1988.

Chandrasekhar, S., *Eddington: The Most Distinguished Astrophysicist of His Time*, New York: Cambridge University Press, 1957.

Clark, Ronald, *Einstein: The Life and Times*, New York: Avon, 1984.

Davies, P., *About Time*, New York: Simon & Schuster, 1995.

Demetz, Peter, *Prague in Black and Gold*, New York: Hill and Wang, 1997.

Do Carmo, M., *Differential Geometry of Curves and Surfaces*, Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1976.

Eddington, Sir Arthur S., *Space, Time and Gravitation: An Outline of the General Relativity Theory*, New York: Harper & Row, 1959.

Eddington, Sir Arthur S., *The Mathematical Theory of Relativity*, New York: Cambridge University Press, 1923.

Einstein, Albert, *Autobiographical Notes*, La Salle, IL: Open Court, 1992.

Einstein, Albert, *Out of My Later Years*, New York: Philosophical Library, 1950.

Einstein, Albert, *The Origins of the General Theory of Relativity*, Glasgow: Jackson, Wylie, 1933.

Einstein, Albert, *The Principle of Relativity*, New York: Dover, 1952. Includes papers by H. Lorentz, H. Weil, H. Minkowski, and notes by A. Sommerfeld.

Einstein, Albert, *Relativity: The Special and the General Theory*, New York: Crown, 1961.

Ferris, Timothy, *Coming of Age in the Milky Way*, New York: Anchor, 1988.

Fölsing, Albrecht, *Albert Einstein*, New York: Penguin, 1997.

Frank, Philipp, *Einstein: His Life and Times*, New York: Knopf, 1957.

French, A. P., ed., *Einstein: A Centenary Volume*, Cambridge, MA: Harvard University Press, 1979.

Gilbert, Martin, *A History of the Twentieth Century*, Volume I: 1900–1933, New York: Morrow, 1997.

Goldsmith, Donald, *Einstein's Greatest Blunder?*, Cambridge, MA: Harvard University Press, 1995.

Golub, L., and Pasachoff, Jay M., *The Solar Corona*, New York: Cambridge University Press, 1998.

Gruning, Michael, *A House for Albert Einstein*, Berlin: Verlag der Nation, 1990.

Guggenheimer, H. W., *Differential Geometry*, New York: Dover, 1977.

Guth, Alan H., *The Inflationary Universe*, Reading, MA: Addison-Wesley, 1997.

Halliday, David, and Resnick, Robert, *Fundamentals of Physics*, Vols. I and II, 3d ed., New York: Wiley, 1988.

Hawking, Stephen, *A Brief History of Time*, New York: Bantam, 1988.

Hentschel, Klaus, *The Einstein Tower: An Intertexture of Dynamic Construction, Relativity Theory and Astronomy*, Stanford, CA: Stan-

ford University Press, 1997.

Holton, Gerald, *Einstein, History, and Other Passions*, Reading, MA: Addison-Wesley, 1996.

Hoskin, Michael, ed., *The Cambridge Illustrated History of Astronomy*, Cambridge, UK: Cambridge University Press, 1997.

Huggett, S. A., et al., *The Geometric Universe: Science, Geometry, and the Work of Roger Penrose*, New York: Oxford University Press, 1998.

Klein, Martin J., et al., *The Collected Papers of Albert Einstein*, Volume V, Princeton, NJ: Princeton University Press, 1993.

Kragh, Helge, *Cosmology Comes of Age*, Princeton, NJ: Princeton University Press, 1996.

Landau, L., and Lifshitz, E., *The Classical Theory of Fields*, Oxford: Pergamon Press, 1962.

Levy, S., ed., *Flavors of Geometry*, New York: Cambridge University Press, 1997.

Lightman, Alan, and Brawer, Roberta, *Origins: The Lives and Worlds of Modern Cosmologists*, Cambridge, MA: Harvard University Press, 1990.

Meserve, B., *Fundamental Concepts of Geometry*, New York: Dover, 1983.

Misner, C. W., Thorne, K. S., and Wheeler, J. A., *Gravitation*, San Francisco: Freeman, 1973.

Pais, Abraham, *Einstein Lived Here*, New York: Oxford University Press, 1994.

Pais, Abraham, *'Subtle Is the Lord . . . ': The Science and the Life of Albert Einstein*, New York: Oxford University Press, 1982.

Pasachoff, Jay M., *Astronomy: From the Earth to the Universe*, 5th Ed., San Diego: Saunders, 1998.

Penrose, Roger, *The Emperor's New Mind*, New York: Oxford University Press, 1989.

Rees, Martin, *Before the Beginning: Our Universe and Others*, New York: Helix Books, 1997.

Reichenbach, H., *The Philosophy of Space and Time*, New York: Dover, 1958.

Rucker, R. B., *Geometry, Relativity, and the Fourth Dimension*, New York: Dover, 1977.

Sayen, J., *Einstein in America*, New York: Crown, 1985.
Schatzman, E., *Our Expanding Universe*, New York: McGraw-Hill, 1992.
Spielberg, N., and Anderson, B., *Seven Ideas that Shook the Universe*, New York: Wiley, 1987.
Stachel, John, et al., *The Collected Papers of Albert Einstein*, Vols. I and II, Princeton, NJ: Princeton University Press, 1987, 1989.
Stoker, J. J., *Differential Geometry*, New York: Wiley, 1969.
Thorne, Kip S., *Black Holes and Time Warps: Einstein's Outrageous Legacy*, New York: Norton, 1994.
Weinberg, Steven, *Gravitation and Cosmology: Principles and Applications of the General Theory of Relativity*, New York: Wiley, 1972.
White, Michael, and Gribbin, John *Einstein: A Life in Science*, New York: Penguin, 1994.
Wolfe, H. E., *Non-Euclidean Geometry*, New York: Holt, Rinehart and Winston, 1945.

译后记

爱因斯坦是20世纪最伟大的物理学家。他的狭义相对论和广义相对论使人们走出了伽利略和牛顿建立的古典物理学体系而进入一个崭新的现代物理学体系，开辟了物理学的新纪元。

爱因斯坦的场方程预言了许多重要的并被后来的物理实验和天体观测所确证的物理学和宇宙学事实。光途经大质量物体如星球近旁时会发生偏折就是其中的一项。本书作者依据真实的史料生动地再现了当年的日食观测，也为我们披露了爱因斯坦与天文学家弗罗因德利希之间的恩恩怨怨的复杂关系，展现了伟人光环背后的多面人生。

在他生命的最后20余年，爱因斯坦一直致力于完成他的统一场论，追寻一个能描述整个宇宙的完美的方程。当今宇宙学家们发现宇宙正在加速膨胀，宇宙岌岌可危。他们重又捡起了被爱因斯坦称为“一生中最大的错误”而从方程中抛弃的宇宙常数。也许爱因斯坦的方程能解释这一切？本书作者对这些宇宙学家第一手的采访材料表明，解开宇宙之谜将是一条漫长的路。

本书作者阿克塞尔是一位多产的科普作家，也是一位数学家。他的作品已被译成10余种语言在世界各地发行。

这本书是我与上海译文出版社继《青少年科学百科全书》和《费马大定理》之后的第三次合作。在此谨向译文出版社的编辑同仁表示由衷的感谢。限于本人水平，译文中难免有不当之处，敬请读者批评指正。

薛　密

2005年3月